Ersatzorgane und Stammzellen

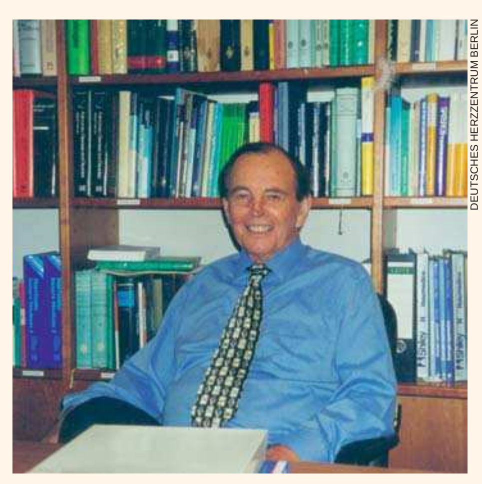


Reinhard Breuer

Kürzlich, auf einer Veranstaltung über Transplantationsmedizin in Berlin, berichteten Experten vom alarmierenden Zustand der Organversorgung im Lande. Jährlich werden Zehntausende von Organen transplantiert, in Deutschland etwa 2500 Nieren, 700 Lebern, knapp 200 Bauchspeicheldrüsen und über hundert Lungen. Auch werden pro Jahr rund 500 Herzen übertragen – eine Therapie, die 1967 Christiaan Barnard (er starb im letzten September) in Kapstadt erstmals an einem Menschen erprobt hatte.

Jedoch steht einer steigenden Zahl wartender Empfänger eine eher stagnierende Zahl von Spendern gegenüber. Derzeit hoffen in Deutschland etwa 14 000 Kranke auf ein Spenderorgan – oft vergebens. Der „Tod auf der Warteliste“, wie es Mediziner ausdrücken, ist traurige Realität.

Das Problem des Organmangels wird bleiben, so lange die Akzeptanz der Organspende in der Bevölkerung nicht steigt. Bedenken, dass etwa Unfallopfer als potenzielle Organspender voreilig für tot erklärt würden, weil Chirurgen ja nur schnell an ein Organ herankommen wollten, scheinen auch heute nicht gänzlich ausgeräumt. Ich gebe zu, dass ich erst seit dieser Veranstaltung einen Organspenderausweis bei mir führe.



DEUTSCHES HERZZENTRUM BERLIN

Christiaan Barnard transplantierte 1967 als Erster das Herz eines Menschen.

Ob Organübertragungen von Mensch zu Mensch oder auch von Tier zu Mensch für alle Zeiten die beste aller Lösungen darstellen werden, ist fraglich. Von großer Bedeutung sind daher nichtbiologische Ersatzteile als Implantate oder Prothesen. Seit einiger Zeit beginnen Forscher aber auch zu hoffen, dass sie mit Hilfe von Stammzellen Gewebe beschädigter Organe nachzüchten können.

Positivmeldungen dazu gab es etwa im letzten Herbst. Es sei, so behaupteten einige Jubelmeldungen („Es geht doch!“), der Herzinfarkt eines Mannes erfolgreich mit Stammzellen aus seinem Knochenmark behandelt worden. Offen blieb jedoch, ob die Besserung wirklich etwas mit den transplantierten Stammzellen zu tun hatte.

Die Züchtung künstlicher Gewebe aus Stammzellen ist im Moment noch Vision. Klinische Realität ist dagegen schon die Züchtung von Haut sowie kleiner Knorpel- und Knochenstücke aus Zellen von Patienten. An komplizierteren Geweben wie Bauchspeicheldrüse oder Leber wird gearbeitet.

Dass die Herstellung von künstlichem Lebergewebe noch am Anfang steht, zeigt Eric Gottwald vom Forschungszentrum Karlsruhe in seinem Beitrag auf Seite 44. Von einer „künstlichen Leber“ will der Biologe noch lange nicht reden: „Bis dahin dauert es noch mindestens zwanzig Jahre.“ ■

INHALT

TITELBILD:

Dieser erste geklonte menschliche Embryo besteht aus sechs Zellen. Sein Erbgut, das von einer Haut- auf eine entkernte Eizelle übertragen wurde, und anhängende Cumuluszellen sind blau angefärbt.

Foto: Advanced Cell Technology

FORSCHUNG AKTUELL *SPEZIAL*

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL



FORSCHUNG AKTUELL *SPEZIAL*

Seite 12

Der erste menschliche Klon

Von Jose B. Cibelli, Robert P. Lanza und Michael D. West

US-Forscher berichten, wie sie erstmals im Reagenzglas für therapeutische Zwecke frühe Embryonen erzeugen konnten, die genetische Kopien eines erwachsenen Menschen sind.



EVOLUTION

Hilfe bei der Geburt

Seite 30

Von Karen R. Rosenberg und Wenda Trevathan

Schon seit mehreren Millionen Jahren gebären Frauen vermutlich ungern alleine. Denn der aufrechte Gang und das große Gehirn machten die Geburt so schwierig, dass Beistand die Gefahren für Mutter und Kind erheblich mindert.

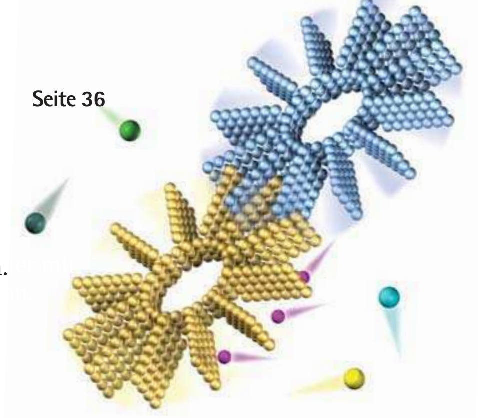
NANOTECHNIK

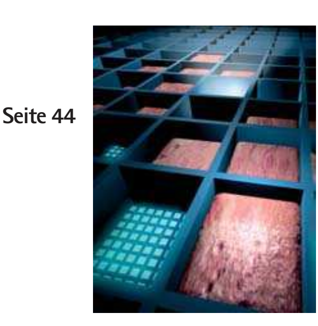
Molekulare Motoren

Von R. Dean Astumian

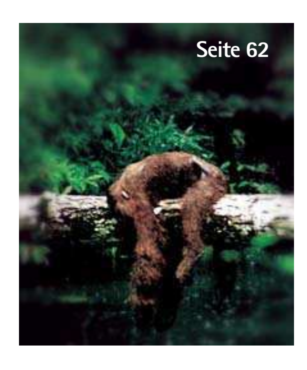
In der lebenden Zelle sind mikroskopische Maschinen am Werk, die durch Zufallsbewegungen und Quanteneffekte angetrieben werden. Wie schaffen es diese winzigen Aggregate, das umgebende Chaos in geordnete Bahnen zu lenken?

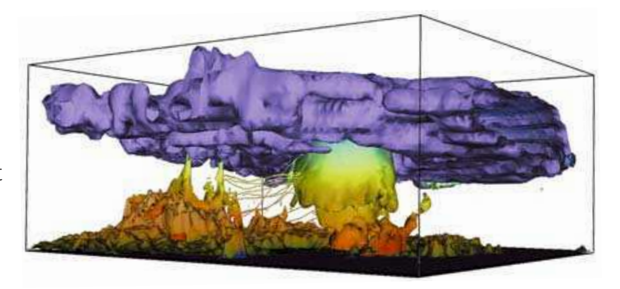
Seite 36











FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Mit transgenen Pflanzen Schwermetallen auf der Spur
Forschung aktuell – Oktober 2001

Schwermetalle lassen sich effektiv mit etablierten Analysetechniken nachweisen. So ist mit verschiedenen spektrometrischen Techniken (AAS, ICP, AES) sowie voltametrischen der Nachweis von Blei, Cadmium, Kupfer, Zink in einem Analysengang ohne weiteres möglich. Es ist nicht einsehbar, dass Kosten oder Aufwand dieser Techniken einem Biotest mit transgenen Pflanzen unterlegen sein sollen. Weiterhin wird die Reproduzierbarkeit und statistische Sicherheit der physiko-chemischen Analyse dem Biotest bei weitem überlegen sein.

Dominik Schwudke, Berlin

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Report: Terror und Trauma
Forschung und Gesellschaft
November 2001

In allen Artikeln zu diesem Report fehlte ein Vergleich, der eigentlich nahe läge, nämlich der zu den Anschlägen der japanischen Aum-Sekte. Der bekannteste war der Sarin-Anschlag auf die Tokioter U-Bahn Mitte der 90er Jahre, der fünftausend Menschen verletzte und elf tötete.

Das Beispiel ist deshalb so wichtig, weil es zeigt, dass das gängige Klischee von den Terroristen als armen, ungebildeten Unterdrückten einfach nicht stimmt und zu kurz greift. Es gibt ein exzellentes Buch von Robert Jay Lifton zum Thema: „Terror für die Unsterblichkeit", Carl Hanser Verlag. Der Autor hat sich intensiv mit der psychologischen Dynamik innerhalb von Terrorsekten beschäftigt und analysiert vor diesem Hintergrund die Aum-Anschläge.

Andreas P. Rauch, Bielefeld

Damaszenerklingen
Oktober 2001

Echter Damast
Der Beitrag erweckt den Eindruck, Schweißdamast sei kein „echter" Damast, die berühmten syrischen Klingen seien ausschließlich Klingen aus Wootz. Es ist jedoch seit langer Zeit bekannt, dass die original Damaszener Schwerter sowohl aus Schweißdamast als auch aus Wootz-Stahl gefertigt wurden. Die Stahlqualität (Härte, Biegefestigkeit) und die Qualität der Muster sind dabei absolut gleichwertig.

Dr. Axel Jörg, Toppenstedt

WILLIAM ROSENTHAL

Damaszenerklinge handgeschmiedet

Deutschsprachige Literatur
Unverzeihlich ist, dass Ihre Redaktion keine deutschsprachige Fachliteratur zum Thema vorstellt. So möchte ich wenigstens auf das hervorragende Buch von Manfred Sachse hinweisen: „Damaszener Stahl – Mythos, Geschichte, Technik, Anwendung", Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft 1989. (Die 2. erw. Auflage ist 1993 beim Verlag Stahleisen, Düsseldorf, erschienen. Die Redaktion)

Helmut Schlereth, Kronach

Grüne Gentechnik – Oktober 2001

Transfer von Wissen statt von Genen
Als Dipl.-Agraringenieur mit mehrjähriger praktischer Erfahrung in verschiedenen Entwicklungsländern kann ich nur vor einer schnellen und weiträumigen Einführung von Pflanzen und Tieren warnen, die mit transferierten Genen aus anderen Arten oder Gattungen ausgestattet sind. Die Harmlosigkeit der Transgene bleibt erst noch zu beweisen; auch Asbest, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), DDT und so weiter galten einst als unschädlich.

Hungernden könnte von Bauern, die durch Schutz vor Krieg und Unruhen sowie verbesserte Märkte für Produktionsmittel und Erzeugnisse mehr erzeugen und vermarkten, wesentlich besser geholfen werden. Dazu bedarf es nicht des Transfers von Genen, sondern des Transfers von Wissen. Gleichzeitig ist Regierungen, die die Agrarerzeugung für Märkte stören oder behindern, ins Gewissen zu reden (Simbabwe liefert gerade ein Musterbeispiel, wie Hungernde geschaffen werden, Afghanistan ist ein ähnlicher Fall). Jedoch produziert kein Bauer für seinen hungernden Nachbarn, sondern für den zahlungsfähigen Kunden. Andernfalls würde er selbst mit seiner Familie ebenfalls bald hungern.

Paul R. Woods, Neumagen-Dhron



PETE MCARTHUR

Genmanipulierter Mais – Lösung für den Welthunger?

Qualität statt Quantität
Die Schwierigkeiten, mit denen Dritte-Welt-Länder zu kämpfen haben, müssen nicht zum ersten Mal als Rechtfertigungsgrund für die Interessen multinationaler Konzerne herhalten. Die Gentechnik offeriert zwar interessante Möglichkeiten, doch packt sie keines der Probleme, deren Lösung Robert B. Horsch vorgibt, tatsächlich an der Wurzel. Sie kann langwierige Know-how- und Infrastrukturinvestitionen in den Entwicklungsländern keinesfalls ersetzen, geschweige denn unterstützen.

Doch der springende Punkt in dieser Diskussion ist viel elementarerer Natur, es geht um einen Paradigmenwechsel in Bezug auf die Zielsetzungen der industrialisierten Gesellschaften. Es ist eine Abkehr vom Denkmuster des „Mehr ist besser" erforderlich. Der Wechsel von der Quantität zur Qualität muss sich langfristig in allen Bereichen durchsetzen.

Der Schritt in die Gentechnik wäre unter diesem Aspekt eindeutig das falsche Signal, denn mit ihr würden lediglich die Symptome, nicht aber die Ursachen der genannten Fehlentwicklungen kuriert.

Marcel Klinkhammer, Fellbach

Errata

Die Grippe-Impfung – Wissenschaft im Alltag – November 2001

In Deutschland sterben keineswegs alljährlich 7000 Menschen infolge einer Grippeerkrankung. Diese von der Arbeitsgemeinschaft Influenza ermittelte Zahl gilt nur für Jahre mit einer mittelstarken Epidemie und wurde anhand der Daten von 1995/96 ermittelt.

UMTS: Mobilfunk der dritten Generation – Oktober 2001

Erste UMTS-Geräte wird Nokia bereits im Verlauf der 2. Hälfte des Jahres 2002 auf den Markt bringen und nicht erst im Verlauf des dritten Quartals des Jahres 2003.

Schmelzen die Polkappen? November 2001

Das Wasservolumen von 2250 Gigatonnen Neuschnee pro Jahr in der Antarktis füllt einen Würfel von 13 Kilometern Kantenlänge und nicht von 150 Kilometern, wie irrtümlicherweise angegeben.

Die Redaktion

Das Ende des Schmetterlingseffekts November 2001

In einem Liter Luft bei Zimmertemperatur sind nicht 10^{26} Moleküle enthalten, sondern nur etwa 2×10^{22}.

Dr.-Ing. P. Nenning, Aßlar

Report: Moderne Lichttechnik – November 2001

Nach dem Überfliegen des ersten Artikels war ich etwas irritiert. Hier wurde ja vorrangig die zukünftige Lichttechnik auf Halbleiterbasis an der mehr als hundert Jahre alten Lichttechnik mit Glühlampen gemessen. Heute steht aber die Strahlungserzeugung vom Ultravioletten über das Sichtbare bis zum Infraroten mit Gasentladungen im Vordergrund. Mit deren neuesten Ergebnissen sollten die auf uns zukommenden Licht erzeugenden Halbleiter verglichen werden.

Dr. Uwe Jens Amlong, Berlin

Sprechende Hände Oktober 2001

In der Einleitung geben Sie eine Einschätzung über Gehörlosenpädagogen wieder, die unserer Erfahrung nach bereits seit Jahren überholt ist. Schon lange gibt es keinen „erbitterten Widerstand" von Lehrern an Hörgeschädigtenschulen gegen die Gebärdensprache mehr. Die Vollwertigkeit und Leistungsfähigkeit dieser Sprache wird allgemein anerkannt.

Rheinisch-Westfälisches Berufskolleg für Hörgeschädigte, Essen

Kosmisches Eis – Oktober 2001

Unter „Rekristallisation" versteht der Werkstoffwissenschaftler eine „Kornneubildung" oder richtiger: eine „Kornwiederbildung" (Veränderung der Kristallstruktur und Korngrenzen) nach vorangegangener Umformung oder Umwandlung, also einen diffusionsgesteuerten (thermisch aktivierten) Vorgang, der eine Kristallneuordnung sowie die Bildung und Wanderung von Großwinkelkorngrenzen beinhaltet.

Für den amorphen Teil des kubischen Eises könnte man durchaus von einer „Kristallisation" sprechen, allerdings wäre es auch nicht falsch, den Übergang von der amorphen in die hexagonale Modifikation als „Umwandlung" zu bezeichnen. Der Übergang des kubischen Anteils in eine hexagonale Modifikation ist dagegen eine Strukturänderung und in jedem Falle eine Umwandlung. Dagegen beinhaltet der Begriff „Umwandlung im weitesten Sinne" eigentlich jegliche Gefügeveränderung und wäre mit „Veränderung der Bindungsverhältnisse" am umfassendsten beschrieben.



NASA AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM

Eiskammern im Weltraum – NGC1999 im Orion

Sicher wäre es besser, den gesamten von Blake und Jenkins beschriebenen Prozess der Bildung von hexagonalem Eis aus kubischem und amorphem Eis als „Umwandlung" zu bezeichnen. Die Verwendung des Begriffs „Rekristallisation" für diesen Vorgang ist aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht falsch. Umwandlungsvorgänge sind in der Regel auch mit sprunghaften Änderungen der „Löslichkeit" verbunden, was die „Austreibung sämtlicher verbliebener Fremdsubstanzen" erklären würde.

Dr.-Ing. habil. Ferdinand Koch, Chemnitz

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Olaf Fritsche, Angelika Hildebrandt, Dr. Susanne Lipps, Dr. Frank Scholz, Matthias Weiß.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-716
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 13,50/€ 6,90/sfr 13,50/öS 98,–; im Abonnement DM 147,86/€ 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 127,91/€ 65,40. Die Preise beinhalten DM 11,73/€ 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 11,74/€ 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Ökotest, Frankfurt am Main, VNU Business Publication, München und VDI-Nachrichten, Düsseldorf. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg



STAMMZELLFORSCHUNG

Die ersten geklonten menschlichen Embryonen

US-Forscher berichten, wie sie erstmals im Reagenzglas frühe Embryonen erzeugen konnten, die genetische Kopien eines erwachsenen Menschen sind. Damit ist die Möglichkeit, erkrankte Organe eines Patienten aus dessen eigenem Gewebe nachzuzüchten, deutlich näher gerückt.

Von Jose B. Cibelli, Robert P. Lanza und Michael D. West

Es waren nur winzige Punkte, aber sie bargen eine enorme Verheißung. Nach monatelangen Experimenten erblickten wir am 13. Oktober 2001 unter dem Mikroskop endlich das Ziel unseres Strebens: kleine Klümpchen aus sich teilenden Zellen, unsichtbar für das nackte Auge. So unscheinbar sie wirkten, so kostbar waren sie; denn es handelte sich unseres Wissens um die ersten menschlichen Klone: frühe Embryonen, die mittels Genomtransfer aus der Zelle eines Erwachsenen erzeugt worden waren.

Wir hofften sie mit etwas Glück dazu bringen zu können, sich durch wiederholte Teilung in Hohlkügelchen aus etwa hundert Zellen zu verwandeln. Aus diesen Keimbläschen oder Blastocysten wollten wir menschliche Stammzellen gewinnen, um daraus schließlich Ersatz für Nerven, Muskeln und andere Gewebe zu züchten. Doch leider entwickelte sich nur einer der Embryonen überhaupt weiter, und auch er erreichte lediglich das Sechs-Zellen-Stadium, bevor er aufhörte sich zu teilen. In einem anderen Experiment konnten wir dann allerdings menschliche Eizellen direkt dazu veranlassen, sich „parthenogenetisch" – also ohne Befruchtung durch ein Spermium – zu Blastocysten zu entwickeln. Für uns symbolisieren diese beiden Errungenschaften, auch wenn noch vieles zu verbessern bleibt, die Morgenröte eines neuen Zeitalters in der Medizin; denn sie haben das therapeutische Klonen einen großen Schritt näher gerückt.

Bei diesem Verfahren geht es darum, mit dem Erbgut von Zellen eines Patienten beispielsweise Gewebe der Bauchspeicheldrüse zur Behandlung der Zuckerkrankheit zu erzeugen – oder Nervenzellen zur Reparatur des beschädigten Rückenmarks von Querschnittsgelähmten. Es unterscheidet sich deutlich vom reproduktiven Klonen, das darauf abzielt, einen geklonten Embryo in die Gebärmutter einer Frau einzupflanzen, die ihn dann als genetische Kopie der Spenderperson zur Welt bringt. Wir glauben, dass das reproduktive Klonen derzeit noch so große Risiken für Mutter und Kind birgt, dass es unvertretbar erscheint. Deshalb befürworten wir ein Verbot dieser Form der Fortpflanzung, bis ihre Sicherheit gewährleistet ist und die damit verbundenen ethischen Fragen geklärt sind.

Verwirrenderweise versuchen die Verfechter des reproduktiven Klonens den Ausdruck „therapeutisches Klonen" gleichfalls für sich zu beanspruchen. Einem Paar, das auf keine andere Weise Nachwuchs bekommen kann, mit Hilfe des Klonens zu einem Kind zu verhelfen, geben sie als Behandlung der Unfruchtbarkeit aus. Wir halten diese Interpretation jedoch nicht für gerechtfertigt und den Gebrauch des Wortes „therapeutisch" in diesem Zusammenhang für missverständlich.

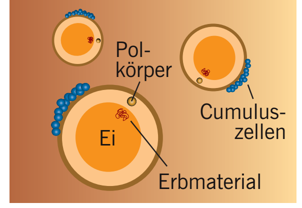
Unsere Experimente

Anfang letzten Jahres hielten wir bei der Firma Advanced Cell Technology (ACT) die Zeit für reif, das Klonen eines menschlichen Embryos zu versuchen. Doch zunächst konsultierten wir unseren internen Ethikbeirat: ein Gremium aus unabhängigen Ethik-Experten, Juristen und Fortpflanzungsmedizinern, das 1999 ins Leben gerufen worden war, um die Forschungen in der Firma unter gesellschaftlich-moralischen Aspekten zu begleiten. Unter Vorsitz von Ronald M. Green, Direktor des Ethik-Instituts am Dartmouth College in Hanover (New Hampshire), erwog der Beirat fünf Schlüsselfragen, bevor er uns in seiner Empfehlung grünes Licht gab (siehe Artikel auf Seite 17).

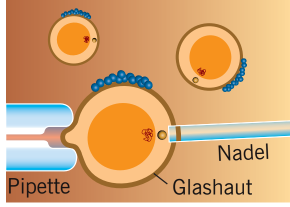
Als nächstes galt es, Frauen für die Spende von Eizellen zu gewinnen und zu

So funktioniert das therapeutischen Klonen

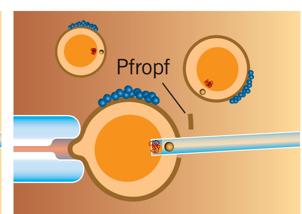
1 Man lässt menschliche Eier in einer Petrischale reifen. Jedes enthält einen Polkörper: den Überrest aus der so genannten Reifeteilung der Eizelle. Außerdem hängen an ihm noch Cumuluszellen aus dem Eierstock.



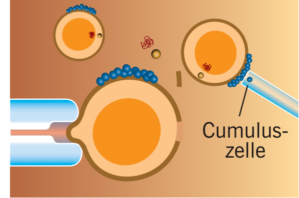
2 Während man ein Ei mit einer Pipette festhält, wird mit einer Injektionsnadel die Glashaut (*Zona pellucida*) angestochen und durch Ansaugen ein Stück daraus entfernt.



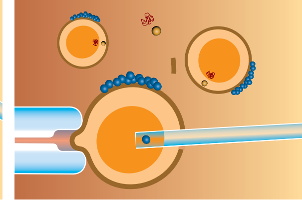
3 Nach dem Ausstoßen des Glashautpfropfs wird die Nadel durch das Loch in das Ei eingeführt und der Polkörper sowie das genetische Material der Eizelle abgesaugt und verworfen.



4 Eine Cumuluszelle von einem anderen Ei wird mit der Hohlnadel aufgenommen. Stattdessen kann auch eine Bindegewebszelle – ein Fibroblast – oder jeweils nur der Zellkern in diesem Schritt verwendet werden.



5 Die Cumuluszelle wird in das entkernte Ei eingeführt und dazu gebracht, mit ihm zu verschmelzen.





Dieser erste geklonte menschliche Embryo besteht aus mindestens sechs Zellen. Sein Erbmaterial erscheint in der angefärbten Aufnahme blau – dasselbe gilt für die Cumuluszellen, die an ihm hängen.

ADVANCED CELL TECHNOLOGY

nen, das sie nie zu Gesicht bekommen. Um das Gewinnen von Spenderinnen und die Entnahme der Eizellen kümmerte sich ein Team unter Leitung von Ann A. Kiessling-Cooper von der Firma Duncan Holly Biomedical in Sommerville (Massachusetts). Ann Kiessling nahm auch an den Beratungen über die ethischen Fragen im Zusammenhang mit den Eispenden teil.

Wir unterzogen die potenziellen Eispenderinnen psychologischen und medizinischen Tests – unter anderem auf Infektionskrankheiten –, um sicher zu stellen, dass sie gesund sind und die Eispende keine schädlichen Folgen für sie hätte. Am Ende blieben uns zwölf geeignete Kandidatinnen.

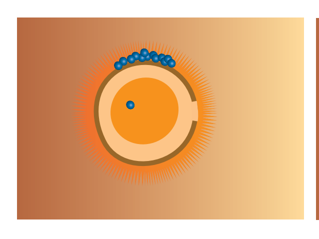
In der Zwischenzeit hatten wir auch Hautproben von mehreren anonymen Personen genommen. Daraus isolierten wir bestimmte Bindegewebszellen – so genannte Fibroblasten – als Kernspender. Sie stammten von Menschen unterschiedlichen Alters, die entweder gesund waren oder eine Krankheit wie Diabetes oder Querschnittslähmung hatten, die vielleicht durch therapeutisches Klonen heilbar wäre.

Den ersten Klonierungsversuch unternahmen wir letzten Juli. Der genaue Zeitpunkt der Experimente hing von den Menstruationszyklen der Eispenderinnen ab. Sie erhielten über mehrere Tage Hormonspritzen, damit sie bei der Ovulation ungefähr zehn statt, wie normalerweise, ein oder zwei Eier freisetzten.

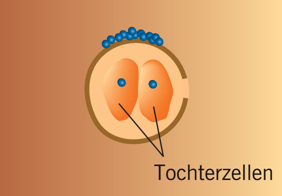
klonende Zellen von Donoren zu erhalten. Das Klonen erscheint zwar im Prinzip einfach, aber der Erfolg hängt von vielen Kleinigkeiten ab, die wir teils noch nicht verstehen. Bei dem grundlegenden Verfahren des Kerntransfers saugen Forscher mit einer äußerst feinen Nadel das Erbmaterial aus einer Eizelle ab. Dann übertragen sie den Kern einer Donorzelle in das entkernte Ei oder vereinigen es direkt mit der Spenderzelle. Das resultierende Gebilde wird schließlich durch Inkubation unter besonderen Bedingungen zu Teilung und Wachstum angeregt.

Anonyme Eispenderinnen für unsere Forschung fanden wir durch Zeitungsanzeigen in Boston und Umgebung. Wir akzeptierten nur Frauen im Alter zwischen 24 und 32 Jahren, die schon mindestens ein Kind hatten. Interessanterweise fühlte sich eine andere Gruppe von Spenderinnen angesprochen, als wenn nach Eizellen für die In-vitro-Fertilisation bei unfruchtbaren Paaren gesucht wird. Auf unsere Anzeigen meldeten sich vor allem Frauen, die unsere Forschungen unterstützen wollten; viele davon wären nicht daran interessiert gewesen, dass ihre Eizellen zur Erzeugung eines Kindes die-

6 Eine raffinierte Mixtur von Chemikalien und Wachstumsfaktoren aktiviert das Ei mit dem eingeschleusten fremden Erbmaterial und regt es zur Teilung an.



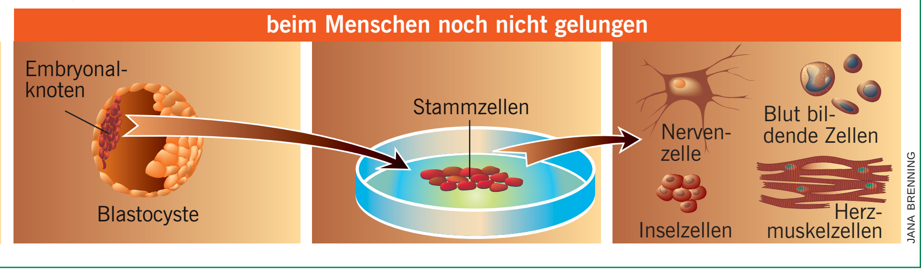
7 Nach etwa 24 Stunden beginnt das aktivierte Ei sich erstmals zu teilen. Die beiden Tochterzellen enthalten nur das eingeschleuste fremde Erbmaterial.



8 Bis zum vierten oder fünften Tag bildet sich eine Hohlkugel aus ungefähr hundert Zellen. Diese Blastocyste enthält einen Zellklumpen an der Innenwand: den Embryonalknoten. Er liefert die begehrten Stammzellen.

9 Nach dem Aufbrechen der Blastocyste wird der Embryonalknoten entnommen und in einer Petrischale kultiviert. Dabei bilden sich Stammzell-Linien.

10 Die Stammzellen lassen sich dazu bringen, je nach Wunsch zu einer Vielzahl von Geweben heranzuwachsen, die dann defektes oder abgestorbenes Gewebe der Patientin ersetzen können, von der die Cumuluszellen stammen.



JANA BRENNING

Ein Erfolg deutete sich im dritten Experimentierzyklus an: Der eingeschleuste Kern eines Fibroblasten schien sich zu teilen, aber die Aufspaltung in zwei Tochterzellen unterblieb leider. Im nächsten Zyklus beschlossen wir deshalb, die Methode anzuwenden, mit der Teruhiko Wakayama (inzwischen auch bei Advanced Cell Technology) und seine Kollegen 1998 an der Universität von Hawaii in Honolulu die ersten erwachsenen Mäuse geklont hatten. Wir nahmen nur noch für einen Teil der Eizellen Haut-Fibroblasten, für die anderen dagegen so genannte Cumuluszellen als Donoren. Sie ernähren im Eierstock sich entwickelnde Eizellen und bleiben teilweise auch nach der Ovulation noch daran kleben. Vor allem aber sind sie sehr klein und daher besser handhabbar. Am Ende brauchten wir 71 Eier von sieben Freiwilligen, bis wir den ersten geklonten frühen Embryo erhielten. Von den acht Eiern, die wir mit Cumuluszellen verschmolzen, erreichten zwei das Vier- und eines das Sechszellstadium.

Außerdem wollten wir herausfinden, ob sich bei menschlichen Eizellen auch ohne Befruchtung durch ein Spermium oder Entkernung und Transfer eines Donorgenoms die Teilung und Embryonalentwicklung einleiten lässt, also eine Jungfernzeugung möglich ist. Nun verfügen reife Eizellen und Spermien normalerweise nur je über die Hälfte des Erbmaterials einer typischen Körperzelle, damit der Embryo, der bei ihrer Verschmelzung entsteht, dann die komplette Ausstattung hat. Allerdings halbieren werdende Eizellen ihren Gensatz erst relativ spät. Wenn man sie vor diesem Stadium künstlich aktiviert, als hätte eine Besamung stattgefunden, behalten sie ihr vollständiges Genom.

Jungfernzeugung

Stammzellen, die sich von solchen parthenogenetisch aktivierten Eizellen ableiten, würden nach einer Transplantation in die Spenderin wohl kaum abgestoßen. Denn sie wären den körpereigenen Zellen sehr ähnlich und sollten kaum Moleküle produzieren, mit denen das Immunsystem nicht vertraut wäre. (Sie würden mit den Körperzellen nicht völlig übereinstimmen, weil während der Bildung von Eizellen und Spermien immer ein gewisser Austausch von DNA-Abschnitten zwischen den einst von der Mutter und vom Vater geerbten Chromosomen stattfindet; das Protein eines derart gemixten Proteins sieht daher etwas anders aus.) Außerdem wären Stammzellen dieser Herkunft für manche Menschen vielleicht ethisch eher akzeptabel als solche aus geklonten frühen Embryonen.

Profitieren könnte von diesem Verfahren beispielsweise eine Frau mit einem Herzinfarkt. Eizellen von ihr würden im Labor aktiviert, sodass sie sich zu Blastocysten entwickeln. Aus ihnen ließen sich dann Stammzellen isolieren und mit einer Kombination diverser Wachstumsfaktoren dazu bringen, in Glasschalen im Labor zu Herzmuskelzellen heranzuwachsen. Diese könnten, in die Frau rückimplantiert, das abgestorbene Herzgewebe ersetzen.

Mit einem ähnlichen Verfahren – der „Androgenese" – Stammzellen für einen Mann zu erzeugen, wäre allerdings komplizierter. Vielleicht könnte man die Kerne zweier seiner Spermien in eine entkernte Spender-Eizelle übertragen, wo sie sich eventuell zu einem vollwertigen Kern vereinen.

Mehreren Wissenschaftlern ist es inzwischen gelungen, unbefruchtete Eizellen von Mäusen und Kaninchen durch Zugabe verschiedener Chemikalien oder elektrische Reizung dazu anzuregen, sich zu Embryonen zu entwickeln. Elizabeth J. Robertson von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) zeigte schon 1983, dass Stammzellen aus parthenogenetischen Mäuse-Embryonen eine Vielzahl von Geweben bilden können – darunter auch Nerven und Muskeln.

Bei unseren Experimenten mit der Jungfernzeugung behandelten wir 22 Eier mit Chemikalien, welche die Konzentration von Ionen im Zell-Inneren verändern. Nachdem wir sie fünf Tage lang in Glasschalen gezüchtet hatten, waren sechs davon zu Gebilden herangewachsen, die wie Blastocysten aussahen. Allerdings enthielt keines einen „Embryonalknoten" an der Innenwand. Nur aus dieser inneren Zellmasse, aus der sich normalerweise der Embryo entwickelt, lassen sich Stammzellen gewinnen; die Wandung wird dagegen Teil der Placenta.

Unsere Motive

Ziel unserer Forschung ist es, eines Tages Patienten durch therapeutisches Klonen oder mit einer Zelltherapie auf parthenogenetischer Basis zu helfen. Im Visier haben wir dabei insbesondere Erkrankungen des Nerven- und Herz-Kreislauf-Systems sowie Diabetes, Autoimmun-Störungen und Krankheiten, die Blut und Knochenmark betreffen.

JOSE B. CIBELLI

Nervenzellen von Menschenaffen, die aus embryonalen Stammzellen im Reagenzglas gezüchtet wurden, unterscheiden sich rein äußerlich nicht von ihren natürlichen Gegenstücken.

Mit Nervenzellen aus dem Reagenzglas hoffen wir nicht nur beschädigtes Rückenmark heilen, sondern auch degenerative Hirnschäden behandeln zu können – etwa die Parkinson'sche Krankheit, bei der Hirnzellen absterben, die einen neuronalen Botenstoff namens Dopamin produzieren, was unkontrollierbares Zittern und Lähmungen hervorruft. Auch bei Alzheimer-Syndrom, Schlaganfällen und Epilepsie verspricht das Verfahren Hilfe.

Wie erwähnt, bieten sich Stammzellen aus geklonten Embryonen für die Züchtung von Insulin produzierenden Inselzellen aus der Bauchspeicheldrüse an. Ebenso leicht ließen sich daraus vermutlich Herzmuskelzellen zur Behandlung von Herzschwäche, Arrhythmien und Vernarbungen nach einem Infarkt gewinnen.

Eine noch interessantere potenzielle Anwendung wäre die Züchtung von Blut- und Knochenmarkzellen. Autoimmun-Erkrankungen wie multiple Sklerose und rheumatoide Arthritis entstehen, wenn Abwehrzellen wie die weißen Blutkörperchen, die aus dem Knochenmark stammen, körpereigenes Gewebe angreifen. Es gibt vorläufige Befunde, wonach sich bei Blutkrebspatienten mit einer zusätzlichen Autoimmunstörung deren Symptome besserten, wenn diese Personen im Rahmen der Tumorbehandlung ein Knochenmark-Transplantat erhielten,

nachdem ihr eigenes Knochenmark durch aggressive Chemotherapie zerstört worden war. Demnach könnten Infusionen mit geklonten hämatopoietischen, also Blut bildenden Stammzellen das Abwehrsystem von Autoimmun-Patienten vielleicht in seinen Urzustand zurückversetzen.

Aber sind geklonte Zellen – oder durch Jungfernzeugung geschaffene – überhaupt normal? Letztlich können nur klinische Tests zeigen, ob sie sicher genug für den routinemäßigen Einsatz bei Patienten sind. Aber immerhin haben sich alle von uns selbst geklonten Tiere bisher als gesund erwiesen. In der Zeitschrift *Science* vom 30. November 2001 berichteten wir über unsere bisherigen Erfolge beim Klonen von Rindern. Von 30 ausgetragenen Kälbern sind sechs kurz nach der Geburt gestorben, aber alle anderen lieferten normale Ergebnisse bei medizinischen Tests; auch ihr Immunsystem funktioniert offenbar genauso gut wie das von normalen Rindern. Zwei Kühe haben sogar selbst schon wieder gesunde Kälber geworfen.

Beim Klonen scheint auch die biologische Uhr der betreffenden Zellen zurückgestellt zu werden, sodass diese in mancher Hinsicht jünger erscheinen als die Zellen, von denen sie abstammen. Vor zwei Jahren berichteten wir, dass bei geklonten Kälbern die Telomere – die Kappen an den Enden der Chromosomen – genauso lang sind wie bei frisch geborenen normalen Tieren. Üblicherweise verkürzen sich die Telomere oder werden beschädigt, während ein Organismus altert. Das therapeutische Klonen könnte also einer alternden Bevölkerung zu „jungen“ Zellen verhelfen.

Im vergangenen Juli fand ein Artikel große Beachtung, in dem Rudolf Jaenisch und seine Kollegen am Whitehead-Institut für Biomedizinische Forschung in Cambridge (Massachusetts) über so genannte Prägungsdefekte bei geklonten Mäusen berichteten. Die genomische Prägung ist eine Art Stempel, der manchen Säugetier-Genen aufgedrückt wird. Er beeinflusst ihre An- und Abschaltung abhängig davon, ob das betreffende Gen vom Vater oder von der Mutter geerbt wurde. Das mitgelieferte Prägungsprogramm wird im Allgemeinen während der Embryonalentwicklung „zurückgesetzt“ – bei weiblichen Individuen auf die rein mütterliche Form.

Obwohl die genomische Prägung bei Mäusen eine wichtige Rolle zu spielen scheint, weiß bisher jedoch niemand, wie bedeutsam das Phänomen beim Menschen ist. Außerdem haben Jaenisch und seine Mitarbeiter keine Mäuse untersucht, die aus Körperzellen ausgewachsener Tiere – beispielsweise Fibroblasten oder Cumuluszellen – geklont worden waren. Vielmehr betrachteten sie aus Embryonalzellen geklonte Mäuse. Nach den Ergebnissen neuerer Untersuchungen, die zur Veröffentlichung eingereicht sind und in den nächsten Monaten erscheinen sollten, ist die Prägung bei Mäusen, die aus erwachsenen Zellen geklont wurden, völlig normal.

Derzeit arbeiten wir intensiv daran, mit den geklonten oder parthenogenetisch erzeugten menschlichen Embryonen ein Entwicklungsstadium zu erreichen, das die Gewinnung von Stammzellen erlaubt – damit aus den ersten Erfolgen ein wirklicher Durchbruch wird. ■





ADVANCED CELL TECHNOLOGY

Jose B. Cibelli *(links),* ***Robert P. Lanza*** *(Mitte) und* ***Michael D. West*** *(rechts) sind für Advanced Cell Technology (ACT) tätig, ein privates Biotechnologie-Unternehmen in Worcester (Massachusetts). Cibelli ist Vizepräsident der Forschungsabteilung. Er hat an der Universität La Plata in Argentinien studiert und an der Universität von Massachusetts in Amherst promoviert. Ihm gelang die Herstellung der ersten geklonten genetisch modifizierten Kälber. Lanza ist Vizepräsident der Abteilung für medizinische und wissenschaftliche Entwicklung. Er hat an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia in Medizin promoviert, war Fulbright-Stipendiat und hat mehrere fachliche wie auch populärwissenschaftliche Bücher verfasst. West ist Präsident und Geschäftsführer von ACT. Er hat am Baylor College of Medicine in Waco (Texas) promoviert und 1990 die Firma Geron Corporation in Menlo Park (Kalifornien) gegründet, für die er bis 1998 als Direktor und Vizepräsident tätig war. Dort hat er Forschungsprogramme über Telomere sowie über die Gewinnung menschlicher embryonaler Stammzellen initiiert und betreut. Der vorliegende Artikel entstand in Zusammenarbeit mit Carol Ezzell, Redakteurin bei Scientific American.*

BIOETHIK

Die Ethik des Klonens

Ein Gremium von Ethikern, Juristen und Fortpflanzungsbiologen hat im Auftrag von Advanced Cell Technology die fünf wesentlichen moralischen Fragen durchleuchtet, die das therapeutische Klonen aufwirft.

Von Ronald M. Green

Frage 1: Welchen ethischen Status hat ein durch Klonen geschaffener Embryo?

Würde ein geklonter Organismus – wie im Falle des Schafes „Dolly“ – in eine Gebärmutter eingepflanzt, könnte er sich im Prinzip zu einem Fetus entwickeln und die Geburtsreife erlangen. Wegen dieser Möglichkeit wird vielfach die Ansicht vertreten, dass das beim therapeutischen Klonen erzeugte menschliche Keimbläschen gleichrangig mit einem normalen Embryo ist und dasselbe Maß an Respekt und Schutz verdient.

Die meisten Mitglieder unseres Beirats sahen das jedoch anders. Ihrer Meinung nach ist ein geklonter Organismus aus nur etwa hundert Zellen schon deshalb kein wirklicher Embryo, weil er nicht aus der Befruchtung eines Eis mit einem Spermium hervorgeht. Vielmehr handelt es sich um einen völlig neuen Typ von biologischer Einheit, den es nie zuvor in der Natur gegeben hat. Auch ▶

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

wenn er das latente Potenzial hat, sich zu einem echten menschlichen Wesen zu entwickeln, gilt dies doch nur sehr eingeschränkt.

Im Keimbläschen- oder Blastocysten-Stadium, wenn der geklonte Organismus üblicherweise zerlegt wird, um eine Stammzell-Linie daraus zu gewinnen, ist er nur ein hohlkugelförmiger Zellhaufen von der Größe des Punktes am Ende dieses Satzes. (In diesem Stadium heften sich Embryonen normalerweise auch noch nicht an die Gebärmutterwand – was viele als den Beginn ihrer eigentlichen Embryonalentwicklung ansehen.) Die Blastocyste hat keine Organe, kann unmöglich denken oder fühlen und verfügt über keine der typisch menschlichen Eigenschaften.

Obwohl das Gremium nachvollziehen konnte, warum manche Menschen diesen winzigen Organismus mit einem Embryo gleichsetzen, zog es selbst den Ausdruck „aktiviertes Ei" vor. Dessen Eigenschaften, so die Quintessenz unserer Überlegungen, rechtfertigen kein Verbot seines Gebrauchs für Forschungen, die im Endeffekt das Leben von Kindern und Erwachsenen retten könnten.



MELISSA SZALKOWSI

Angriff auf die Menschenwürde oder Heilsversprechen? Die Züchtung menschlicher Gewebe aus geklonten embryonalen Stammzellen ist heftig umstritten.

Frage 2: Ist es erlaubt, eine solche sich entwickelnde menschliche Einheit zu schaffen, nur um sie wieder zu zerstören?

Wer glaubt, dass das menschliche Leben mit der Empfängnis beginnt, und wer außerdem aktivierte Eier als ethisch gleichwertig mit menschlichen Embryonen betrachtet, der kann Forschung für das therapeutische Klonen nicht billigen. Für einen solchen Menschen ist dieses Verfahren gleichbedeutend damit, ein lebendes Kind zu töten, damit seine Organe anderen zugute kommen.

Einige von denen, die so denken, halten aber unter Umständen Experimente mit menschlichen Stammzellen aus „überzähligen" Embryonen, die bei Reagenzglas-Befruchtungen übrig geblieben sind, für moralisch vertretbar. Sie überlegen – zu Recht oder Unrecht –, dass diese Embryonen mit Sicherheit eines Tages vernichtet werden und dass sie wenigstens noch einem guten Zweck dienen, wenn sie für die medizinische Forschung verwendet werden. Therapeutisches Klonen bleibt für solche Personen dagegen völlig inakzeptabel, weil dabei ein – in ihren Augen menschliches – Wesen von vorneherein in der Absicht erzeugt wird, es anschließend zu zerstören.

Andere – so auch die Mitglieder unseres Beirats – gestehen den Einheiten, die beim therapeutischen Klonen gebildet werden, aber nicht den Status eines menschlichen Wesens zu. Sie argumentieren, dass der Nutzen dieser Forschung und der Behandlungsmethoden, die daraus hervorgehen könnten, die rechtlich-moralischen Ansprüche von aktivierten Eiern bei weitem überwiegt.

Interessanterweise teilen einige zwar diese moralische Bewertung, lehnen die Forschung aber dennoch aus symbolischen Gründen ab. Sie erachten es prinzipiell für unverantwortlich, menschliches Leben in welcher Form auch immer nur dafür zu erzeugen, dass es später ausgelöscht wird. Ihre Hauptsorge ist, dass das therapeutische Klonen die Gesellschaft auf eine moralisch abschüssige Bahn bringt; eines Tages könnte es dann auch vertretbar erscheinen, Organe Erwachsener ohne deren Einwilligung zu transplantieren.

Symbolische und Dammbruch-Argumente wecken starke Emotionen, sind aber schwer nüchtern abzuwägen. Stimmt es wirklich, dass die Verwendung aktivierter Eier für lebensrettende Therapien einem solchen denkbaren Missbrauch Vorschub leistet? Trifft nicht eher das Gegenteil zu? Wenn die medizinische Forschung die Chancen auf ein langes Dasein in Gesundheit verbessert, erhöht sie dann nicht vielmehr die Achtung vor dem menschlichen Leben?

Mitglieder des Beirats berücksichtigten beispielsweise das Faktum, dass in Großbritannien von 1990 bis vor kurzem die absichtliche Erzeugung und Zerstörung menschlicher Embryonen bis zum Alter von 14 Tagen für Forschungszwecke zulässig war. Eine nachteilige Wirkung dieser Erlaubnis auf die britische Gesellschaft ist nicht feststellbar. Am Ende waren die symbolischen und Dammbruch-Argumente für die Gremium-Mitglieder nicht überzeugend genug, ein Einstellen der Forschung für das therapeutische Klonen zu rechtfertigen. ▶

„Lieber gleich die ganze Wahrheit sagen“

Davor Solter, Direktor am Freiburger Max-Planck-Institut für Immunbiologie und Pionier von Klontechniken, kommentiert die Arbeiten der Forscher bei Advanced Cell Technology.

Spektrum der Wissenschaft: *Die Firma Advanced Cell Technology preist ihre neuesten Ergebnisse als Meilenstein beim therapeutischen Klonen ...*

Davor Solter: Davon kann keine Rede sein. Es ist im Mausmodell längst bewiesen, dass es bei Säugetieren möglich ist, aus Körperzellen durch Kerntransfer Embryonen zu gewinnen und aus ihnen dann embryonale Stammzellen zu züchten. Hätte das Team die Technik jetzt auch beim Menschen etabliert, wäre dies ein weiterer Schritt, wenngleich intellektuell nicht neu. Ich sehe aber gar keinen geklonten menschlichen Embryo auf den Bildern in der Publikation.

Spektrum: *Bei den Versuchen mit Kerntransfer gab es aber doch bei drei „Embryonen“ erste Zellteilungen.*

Solter: Es ist alles andere als sicher, dass es sich wirklich um echte Zellteilungen handelt. Es könnten ebenso gut Fragmentierungen sein, bei denen keine Kernteilung stattfindet, sondern sich nur das Zytoplasma einer Zelle teilt. Das sieht mitunter sehr ähnlich aus wie ein Vierzellstadium, ist es aber nicht. Das Risiko für Fragmentierung erhöht sich, wenn Sie ältere Eizellen verwenden. Und – es ist ja vor allem nirgends gelungen, bis in Stadien vorzudringen, aus denen sich embryonale Stammzellen gewinnen lassen.

Spektrum: *Immerhin lieferte die zweite Strategie, bei der Eizellen aktiviert wurden, Blastocysten.*

Solter: Die Resultate überzeugen mich nicht. Menschliche Blastocysten sehen normalerweise wirklich perfekt aus. Bei denen hier in der Arbeit muss ich sagen, sie sehen hoffnungslos aus – ausgeschlossen, dass sich aus diesen Strukturen etwas Vitales entwickelt – schon gar nicht eine Kultur embryonaler Stammzellen.

Spektrum: *Warum waren die Versuche nicht erfolgreicher?*

Solter: Jedes Säugetier ist anders. Wir wissen heute, wie wir bei Mäusen mit großen Erfolgsraten Blastocysten nach einem Kerntransfer erzielen können, und wie wir daraus embryonale Stammzellen gewinnen. Es könnte sein, dass dies beim Menschen schwieriger ist. Wenn Sie die technischen Probleme lösen wollen, brauchen Sie auch andere Versuchsbedingungen, vor allem einen viel größeren Vorrat an Eizellen. Die Experimentatoren haben jeweils mit rund zwei Dutzend Eizellen gearbeitet. Doch unter 200 braucht man erst gar nicht zu beginnen.

Spektrum: *Prinzipiell befürworten Sie aber solche Versuche?*

Solter: Ich habe nichts dagegen, wenn jemand zum Beispiel eine Therapie gegen Alzheimer mit menschlichen embryonalen Stammzellen entwickelt. Solche Versuche sind sogar nötig; denn nur Stammzellen, die von einem Patienten direkt abstammen, liefern auch Gewebe, das immunkompatibel mit dem Patienten ist.

Spektrum: *Warum soll das Arbeiten mit „aktivierten“ Eizellen einen Ausweg aus dem ethischen Dilemma des Klonens bieten? Ist eine solche Eizelle kein Embryo?*

Solter: Nein. Sie kreieren kein neues Genom wie bei der Verschmelzung von Ei- und Samenzelle und das Produkt kann sich nicht zu einem Lebewesen entwickeln. Ein reproduktives Klonen von Menschen wäre also ausgeschlossen. Bei Mäusen gelingt diese Aktivierung von Eizellen seit langem und wir wissen, dass sie auch bei der Implantation in einen Uterus ganz sicher nicht heranwachsen werden.

Spektrum: *Warum?*

Solter: Manche Gene entfalten ihre Wirkung im Embryo nur dann, wenn sie von einem der beiden Elternteile abstammen – sie brauchen also mütterliche und väterliche Allele. Das ist hier aber nicht der Fall. Es wäre daher wohl auch nach heutiger Rechtslage in Deutschland möglich, solche Blastocysten für die Forschung zu gebrauchen. Daraus gezüchtete embryonale Stammzellen sind aber anders als jene, die aus Blastocysten nach einem Kerntransfer entstehen. Ob Sie sich weniger für klinische Zwecke eignen, bliebe abzuwarten. Ich fände es besser, man würde die Gesetze und Richtlinien ändern und die Forschung mit Kerntransfer beim Menschen auch hier zu Lande erlauben. Denn das bietet am ehesten Aussicht auf klinischen Erfolg.

Spektrum: *Damit liegen Sie weit jenseits der Vorstellungen selbst der DFG. Die Debatte tobt derzeit ja erst einmal nur um die Frage, ob hiesige Forscher mit menschlichen embryonalen Zellen arbeiten dürfen, die importiert wurden.*

Solter: Aber man geht dabei nur den Weg des geringsten Widerstandes. Für einen guten Teil der Grundlagenforschung würde es sicherlich ausreichen, mit solchen importierten Zellen zu arbeiten. Etwa um zu klären, wie sie überhaupt zu kultivieren sind, wie sich daraus Nervenzellen oder Pankreaszellen herstellen lassen und Ähnliches. Am Ende wird sich dann aber zeigen, dass ein wichtiges Problem nur verschoben ist.

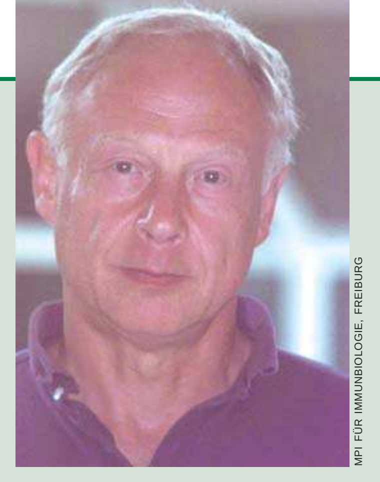
Spektrum: *Denn es bliebe die immunologische Abstoßung solcher Zellen und Gewebe?*

Solter: Ja – man wird in der Praxis deshalb doch auf den Kerntransfer, das Klonen, zurückgreifen müssen. Und ich bin sicher – wenn man erst einmal zeigen kann, dass diese Therapie tatsächlich funktioniert, dann wird das Embryonenschutzgesetz in der Bundesrepublik von einem Tag auf den anderen verschwinden. Es wäre aufrichtiger, von Anfang an zu sagen, was die Anwendung dieser Technik eben bedeutet. Ich bin dafür, den Leuten die Wahrheit zu sagen: Wenn diese Therapie funktioniert, wird sie ohne das therapeutische Klonen nicht auskommen. Als Antwort auf diese These erhielt ich einmal einen Rundbrief etlicher deutscher Wissenschaftler, die darin erklärten, dass sie niemals mit menschlichen embryonalen Zellen arbeiten würden, nur mit adulten Stammzellen. Für mich ist auch das allerdings eher die Devise: Bloß keine schlafenden Hunde wecken.

Spektrum: *Aber warum? Adulte Stammzellen gelten doch mittlerweile als ernsthafte Alternative. Eine Fülle jüngster Arbeiten demonstriert, dass sich aus ihnen ebenfalls vermutlich Gewebe für alle möglichen Therapien entwickeln lassen. Und das Problem der immunologischen Abstoßung wäre von Anfang an gelöst – schließlich stammen solche Stammzellen direkt aus dem Körper eines Patienten ...*

Solter: Sicher, vieles an ihnen ist interessant. Bei Verbrennungen etwa könnten die Stammzellen aus der Haut ausreichen, da gibt es schon beeindruckende klinische Ergebnisse. Das Problem mit adulten Stammzellen bleibt aber ihre oft zu geringe Zahl. Wenn Sie Patienten therapieren wollen,





MPI FÜR IMMUNBIOLOGIE, FREIBURG

Davor Solter entwickelte 1983 an Mäusen die erste verlässliche Methode, Kerne aus einer Zelle in eine andere zu transferieren.

werden Sie Milliarden von Zellen benötigen. Und mit adulten Zellen schaffen Sie es nicht, solche Mengen herzustellen. Ich gehe davon aus, dass ihnen die proliferative Fähigkeit dafür fehlt. Warum also die Hälfte der Möglichkeiten wegwerfen? Wir können aus der Erforschung beider Zelltypen viel lernen. Bis zur klinischen Anwendung ist es ohnehin noch sehr sehr weit.

Spektrum: *Das therapeutische Klonen von Menschen wird indirekt auch einem reproduktiven Klonen Vorschub leisten. Der kopierte Mensch ist nicht mehr weit?*

Solter: Ich bin kein prinzipieller Gegner eines reproduktiven Klonens. Heute allerdings ist es beim Menschen völlig abwegig. Das Risiko von Fehlbildungen und -geburten ist derzeit viel zu hoch, weil niemand die Technik beherrscht. Man braucht also dem, was Antinori und seine Mitstreiter vorhaben, erst gar keine Beachtung zu schenken. Die Masse der Belege zeigt, dass geklonte Tiere abnormal sind. Wenn man einen Weg findet, reproduktives Klonen so sicher zu machen wie die bisherigen Formen der Fortpflanzung, hätte ich keine Probleme damit. Es hätte keinen Einfluss auf die Gesellschaft und würde sicher auch nur von wenigen Menschen genutzt.

Spektrum: *Aber das wäre doch ein radikaler Paradigmenwechsel in unserer Kultur. Ein Individuum würde seine genetische Ausstattung nicht mehr einem Zufallsprozess verdanken – sondern wäre tatsächlich die Kopie eines anderen.*

Solter: Was machen Sie denn bislang bei der Wahl Ihres Partners? Sie suchen ihn aus! Nach Ihren eigenen Kriterien, oder? Ich halte den Einfluss, den die Menschen dadurch auf die genetische Ausstattung ihrer Kinder nehmen, für mindestens so groß, wie das beim Klonen der Fall wäre.

Das Gespräch führte ***Bernhard Epping****, promovierter Biologe und freier Journalist in Tübingen.*

Frage 3: Ist es legitim, menschliche Eizellen für Forschungszwecke zu gewinnen?

Die Notwendigkeit, größere Mengen an menschlichen Eiern zu beschaffen, wirft eine der heikelsten ethischen Fragen im Zusammenhang mit der Klonforschung auf. In jedem monatlichen Menstruationszyklus produziert eine Frau in der Regel nur ein bis zwei reife Eier. Für die Forschung werden jedoch deutlich mehr benötigt. Deshalb erhält die potenzielle Spenderin ovulationsfördernde Medikamente ähnlich wie für eine Reagenzglasbefruchtung. In seltenen Fällen können diese Arzneimittel ein so genanntes Hyperstimulationssyndrom auslösen – mit Leberschäden, Nierenversagen oder Schlaganfall als möglichen Folgen. Einige Untersuchungen legen zudem einen Zusammenhang zwischen ovulationsfördernden Wirkstoffen und einem erhöhten Risiko für Eierstockkrebs nahe. Auch die chirurgische Entnahme der Eier birgt Risiken – etwa die Gefahr von Blutungen oder Komplikationen bei der Narkose. Ist es moralisch vertretbar, eine Frau für Forschungszwecke diesen Risiken auszusetzen? Was bedeutet es, wenn Frauen dafür bezahlt werden, sich derlei Gefahren auszusetzen? Wird dann menschliches reproduktives Material zum kommerziellen Produkt degradiert? Der Verkauf von menschlichen Organen oder Babys ist nicht erlaubt. Sind Eier etwas anderes?

Beim Abwägen dieser Bedenken zogen die Mitglieder des Gremiums zwei Tatsachen in Betracht. Zum einen existiert in den USA bereits ein bedeutender Markt für menschliche Eier zu Reproduktionszwecken. Junge Frauen erhalten dort erhebliche Summen für die Spende von Eiern, die unfruchtbaren Frauen oder Paaren zu Kindern verhelfen können. Wenn die Risiken in diesem Fall in Kauf genommen werden, so fragten wir uns, warum sollen sie dann nicht auch vertretbar sein, wenn es um die Förderung medizinischer Forschungen geht, die Menschenleben retten könnten? Und wenn man Frauen für den Zeitaufwand und die Unbequemlichkeiten bei der Eispende für Fortpflanzungszwecke finanziell entschädigen darf, warum sollte das Gleiche nicht auch bei der Eispende für Forschungszwecke erlaubt sein?

Zum anderen ist festzustellen, dass freiwillige Versuchspersonen oft beträchtliche Risiken auf sich nehmen, um die medizinische Forschung voranzubringen. Wenn sich eine Person aus freien Stücken bereit erklären darf, an einer gefährlichen Studie mit einem Malaria-Impfstoff teilzunehmen, um bei der Eindämmung der Seuche zu helfen, warum sollte man sie daran hindern, für ähnliche lebensrettende Forschungen Eier zu spenden?

Deshalb kamen wir zu dem Schluss, dass es eine unangemessene Bevormundung wäre, die Eispende für Forschungszwecke zu verbieten. Zugleich legten wir aber eine strenge Prozedur der informierten Zustimmung fest, bei der die Eispenderinnen in vollem Umfang über die möglichen Gefahren aufgeklärt werden sollten. Außerdem bestanden wir darauf, die ovulationsfördernden Mittel nur in sicheren Dosen zu verabreichen. Schließlich sprachen wir uns für eine moderate Bezahlung aus: 4000 Dollar (etwa 40 Dollar pro Stunde); das entspricht in etwa dem, was in Neuengland im Durchschnitt für die Eispende zu Fortpflanzungszwecken vergütet wird. Wir wollten auf alle Fälle vermeiden, dass der finanzielle Ausgleich so hoch ist, dass er die Frauen möglicherweise blind macht für die Risiken.

Frage 4: Welche ethischen Probleme ergeben sich für die Person, deren Zellen geklont werden?

Auf den ersten Blick scheinen diejenigen, deren Zellen (gewöhnlich Haut-Fibroblasten) beim therapeutischen Klonen mit entkernten Eiern verschmolzen werden, keinerlei Risiko einzugehen – abgesehen von dem unwahrscheinlichen Fall einer Infektion an der Entnahmestelle auf der Haut. Aber Klonen ist ein umstrittenes Thema, das alle Beteiligten neuartigen Gefahren aussetzt. Zellspender könnten zum Beispiel ungewollt in den Mittelpunkt eines Medienspektakels geraten, wenn die Öffentlichkeit erfährt, dass sie eingewilligt haben, sich klonen zu lassen. Um dies zu verhindern, bestand der Ethikbeirat auf Prozeduren, die strenge Vertraulichkeit für Ei- wie Zellspender gewährleisten (es sei denn, diese geben sich selbst zu erkennen).

Eine Frage, die uns lange beschäftigte, war, ob Kinder Zellen für solche Forschungen spenden dürften. Wir kamen zu dem Schluss, dass dies normalerweise nicht ratsam wäre. Beim Erreichen des Erwachsenenalters könnten sich die Betreffenden moralisch bloßgestellt fühlen, weil sie sich als Heranwachsende zur Teilnahme an einem Klonexperiment verleiten ließen. Wir machten allerdings eine Ausnahme im Fall eines Kindes mit einer tödlichen Erbkrankheit. Wir wussten, dass eine Stammzell-Linie auf der Basis seiner DNA ein sehr wichtiges Hilfsmittel bei der Suche nach einer Heilmethode für die Krankheit wäre. Ob- ▶



wohl das Kind vermutlich nicht lange genug leben würde, um von dieser Forschung zu profitieren, billigten wir den Eltern das Recht zu, in seinem Namen zu entscheiden. Die Zellen dieses Kindes wurden allerdings noch nicht für einen Klonierungsversuch verwendet.

FRAGE 5: Wird das therapeutische Klonen das reproduktive Klonen und die Geburt eines geklonten Kindes begünstigen?

Diese Frage gibt nur denen Anlass zur Sorge, die überzeugt sind, dass das reproduktive Klonen ethisch verwerflich ist und immer bleiben wird. Viele dieser Kritiker begründen ihre Einstellung mit dem Hinweis auf die hohe Zahl von Todesfällen und Erbschäden bei geklonten Tieren. Andere beunruhigt der Gedanke an mögliche indirekte negative Folgen. So verweisen sie auf potenzielle psychologische Risiken für die Kinder von Familien, bei denen ein Elternteil zugleich der genetische Zwilling eines Kindes ist. Sie befürchten, dass geklonte Kinder der unrealistischen Erwartung ausgesetzt sind, an die Leistungen ihres genetischen Vorgängers anzuknüpfen. Und sie haben große Bedenken bezüglich der sozialen Risiken des Klonens; sie sehen die Gefahr, dass Gesellschaften beschließen, eine begrenzte Zahl von Personen mit erwünschtem Erbgut in großem Maßstab für militärische oder andere Zwecke zu vervielfältigen. Dagegen begrüßen andere die Möglichkeit des Klonens. Sie sehen darin eine neue Chance, gewissen unfruchtbaren Paaren zu biologisch verwandtem Nachwuchs zu verhelfen oder das Risiko bestimmter Erbkrankheiten zu verringern.

Was immer man jedoch vom reproduktiven Klonen hält – es wird durch ein Verbot des therapeutischen Klonens nicht unwahrscheinlicher. Einerseits könnte das therapeutische Klonen Forschern zwar helfen, die Techniken für das reproduktive Klonen zu perfektionieren. Andererseits könnte es aber auch sehr viel deutlicher machen, welche Gefahren der Versuch birgt, auf diesem Weg ein menschliches Wesen zu erzeugen. Es gibt bereits Hinweise darauf, dass bei einigen geklonten Tieren die Genexpression gestört ist – ebenso die genomische Prägung: der normale Vorgang des Still-Legens väterlicher oder mütterlicher Gene. Solche Probleme würde in Frage kommende Eltern vielleicht davon abbringen, ein geklontes Baby bekommen zu wollen. Demnach könnte die Forschung über das therapeutische Klonen in Wahrheit sogar die Wahrscheinlichkeit verringern, dass Klonen als sinnvolle Option für die eigene Fortpflanzung betrachtet wird.

Ein Verbot des therapeutischen Klonens würde wild entschlossene Forscher in privaten Institutionen ohnehin nicht daran hindern, auf eigene Faust weiter an der reproduktiven Variante zu arbeiten. Die Sekte der Raëlianer und der italienische Reproduktionsmediziner Severino Antinori haben bereits die Absicht bekundet, ein menschliches Wesen zu klonen. Und sie werden es wohl unter allen Umständen versuchen – ob die Forschung über das therapeutische Klonen nun untersagt wird oder nicht. Ein solches Verbot würde nur nützliche Forschung blockieren, während es weniger verantwortungsvolle Personen nicht davon abhielte, das reproduktive Klonen überall dort zu probieren, wo die gesetzlichen Bestimmungen das erlauben. Indem das Verbot vertrauenswürdige Forschung über die Zellbiologie des menschlichen Klonens unterbindet, sorgt es zugleich dafür, dass die ersten Versuche, einen Menschen zu klonen, auf einem dürftigen wissenschaftlichen Fundament erfolgen.

Unser Ethikrat musste sich mit neuartigen, schwierigen Fragen auseinander setzen, aber wir haben es unserer Meinung nach geschafft, dem Forschungsprogramm für therapeutisches Klonen von Advanced Cell Technology eine tragfähige ethische Grundlage zu geben. Doch die Fortschritte in Biotechnologie und Genetik werfen immer neue moralische Fragen auf. Die künftigen Aufgaben von Gremien wie dem unsrigen sind anspruchsvoll. Der Lohn besteht darin, an der vordersten Front der medizinischen Forschung Entscheidungshilfe leisten zu können. ■

Ronald M. Green ist Direktor des Ethik-Instituts am Dartmouth College in Hanover (New Hampshire).

Die rechtliche Situation

USA, Großbritannien, Deutschland: drei unterschiedliche Regelungen zum Klonen

Am 31. Juli 2001 stimmte das von den Republikanern beherrschte US-Repräsentantenhaus für ein breites Klonverbot beim Menschen. Dies beträfe auch die Herstellung von Klon-Embryonen zu therapeutischen Zwecken und die unmittelbar damit verbundenen Forschungen. Wer immer einen geklonten menschlichen Embryo erzeugt, müsste mit Haftstrafen von bis zu zehn Jahren und Geldstrafen bis zu einer Million Dollar rechnen. Allerdings muss auch der von den Demokraten dominierte Senat der Gesetzesvorlage noch zustimmen. Er wird sich Anfang dieses Jahres mit ihr befassen. Nach einem Erlass von Präsident George W. Bush dürfen allerdings bereits heute in den USA Forscher, die staatliche Fördermittel erhalten, nur mit bereits etablierten Linien von Stammzellen arbeiten und keine neuen gewinnen, erst recht nicht solche aus eigens geklonten Embryonen. Privat finanzierte Forschungen zur Erzeugung menschlicher Klon-Embryonen sind derzeit noch zulässig.

Das britische Parlament hatte sein 1990 erlassenes Embryonengesetz im Jahr 2000 erweitert, um das therapeutische Klonen zur Herstellung von Ersatzgeweben für Patienten zu erlauben. Ein von Abtreibungsgegnern angerufenes Gericht fand allerdings einen Formfehler. Da Klonen keinen Embryo betrifft, der aus einer Vereinigung von Ei- und Samenzelle hervorgegangen ist, fällt es formal nicht unter das Gesetz. Analog dazu wäre aber auch das reproduktive Klonen nicht mehr verboten. Der italienische Reproduktionsmediziner Severino Antinori wollte diese Lücke nutzen, um in Großbritannien unfruchtbare Menschen nach dem Verfahren zu „kopieren“, mit dem vor knapp fünf Jahren das Schaf Dolly erzeugt wurde. Daraufhin verabschiedete das britische Parlament Ende November ein Eilgesetz zum Verbot des reproduktiven Klonens.

In Deutschland untersagt das Embryonenschutzgesetz von 1991 jegliches Klonen, nicht aber die Forschung an importierten embryonalen Stammzellen. Allerdings verzichten die Wissenschaftler bisher freiwillig darauf. Die Enquete-Kommission hat sich für ein Verbot, der Ethikrat dagegen ausgesprochen. Ende Januar wird der Bundestag entscheiden.

Nächtlicher Feuerball

Die Leoniden boten diesmal im Osten Nordamerikas ein Schauspiel der Extraklasse. Dort erlebten Beobachter am frühen Morgen des 18. November einen regelrechten Meteorsturm mit durchschnittlich einer Sternschnuppe pro Sekunde. Der Grund: Die Erde raste mit rund 70 Kilometern pro Sekunde mitten durch das Staubband, das der Komet Temple-Tuttle bei seiner Sonnenumrundung im Jahre 1767 hinterlassen hatte (seine Periode beträgt 33 Jahre, und sein letzter Periheldurchgang war im Februar 1998). Dem amerikanischen Astrofotografen Jerry Lodriguss gelang mit einem hochempfindlichen Film diese Aufnahme eines etwa 5 mm großen Staubteilchens, das in rund 100 km Höhe auf einer Strecke von drei Monddurchmessern verglühte. Die Farben stammen von Stickstoff- und Sauerstoffatomen, die der sich aufheizende Meteor zur Fluoreszenz anregte. Da die Morgendämmerung bereits eingesetzt hatte, erscheint auf dem 5 Minuten belichteten Foto in Brauntönen auch die „Rauchfahne“ des verglühten Meteors, beleuchtet von der dicht unter dem Horizont stehenden Sonne.



JERRY LODRIGUSS

VERHALTENSFORSCHUNG

Transvestiten wollen Wärme

Männchen im Dutzend umschlingen ein Weibchen. Was aussieht wie eine wilde Orgie, ist jedoch nur das Ergebnis eines frechen Betrugsmanövers – und die Angebetete in der Mitte in Wahrheit ein unterkühltes Männchen auf der Suche nach Wärme und Schutz. Mit Pheromonen ähnlich denen eines Weibchens narrt es seine Geschlechtsgenossen. Eine solche Täuschung ist bei männlichen Rotseitigen Strumpfbandnattern (*Thamnophis sirtalis parietalis*) in Kanada durchaus üblich. Bislang dachte man, dass sich die „Transvestiten" dadurch auch in Gegenwart stärkerer Rivalen unbehelligten Zugang zu einem Weibchen erschleichen. Biologen um Rick Shine von der Universität Sidney haben nun jedoch ein anderes Motiv dahinter entdeckt: Die Betrüger wollen sich nach achtmonatigem Winterschlaf schlicht aufwärmen. Messungen mit Temperatursensoren an unterkühlten lebenden sowie toten Weibchen zeigten, dass das Getümmel liebeshungriger Männchen die Temperatur oft um über drei Grad erhöht. Ein Knäuel aus Schlangen bietet zudem Schutz vor Krähen, für die die winterträgen Nattern allein eine leichte Beute sind. *(Nature, Bd. 414, S. 267)*

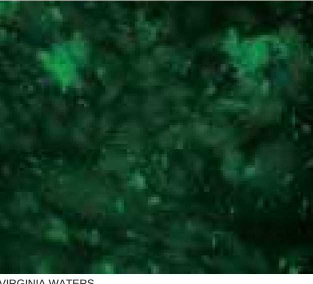

D. O'CONNOR, RICK SHINE

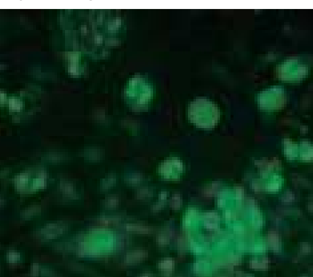
Das von Verehrern umschlungene „Weibchen" ist in Wahrheit ein Wärme suchendes Männchen.

MIKROBIOLOGIE

Sex zwischen Hamstern und Bakterien

Bakterien sind beim Sex nicht eben wählerisch: Sie paaren sich auch mit Vertretern fremder Arten, ja werden selbst mit Pflanzen- oder Hefezellen intim. Bei dieser „Konjugation" tauschen sie ringförmige DNA-Stücke aus, auf denen so nützliche Dinge wie Resistenzgene liegen. Virginia Waters von der Universität von Kalifornien in San Diego musste nun feststellen, dass die Mikroben auch vor Tieren nicht Halt machen. Sie brachten Zellen von Hamstern und dem Darmbakterium *Escherichia coli* über Nacht zusammen. Den Mikroben hatten sie zuvor das Gen für ein grün fluoreszierendes Protein eingepflanzt. Leuchteten am Abend nur die Bakterien, so taten es am Morgen auch einige Hamsterzellen. Da das Nährmedium DNA-verdauende Enzyme enthielt, konnte das bakterielle Erbgut nur per Konjugation in die Hamsterzellen gelangt sein. Sehr fruchtbar war das nächtliche Abenteuer allerdings nicht: Nur eine von 10 000 tierischen Zellen hatte das Fluoreszenzgen übernommen. Dennoch hat das Ergebnis praktische Bedeutung für die Gentherapie. Mit Bakterien statt der bisher meist verwendeten Viren als Genfähren ließen sich in Zukunft sehr viel größere DNA-Abschnitte in menschliche Zellen einschleusen. (*Nature Genetics, Bd. 29, S. 375*)


VIRGINIA WATERS

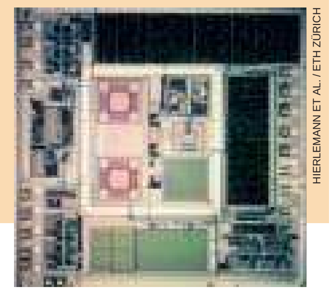


Vor dem Stelldichein leuchteten nur die Bakterien (oben), danach auch runde Hamsterzellen.

SENSORTECHNIK

Elektronische Spürnase

Kanarienvögel warnten früher Bergleute vor zu hohem Kohlenmonoxidanteil in der Grubenluft. Jetzt vermag ein kaum fingernagelgroßer Mikrochip – entwickelt von Alexander Hierlemann und seinen Kollegen an der ETH Zürich – die verschiedensten Schadstoffe bis zu einer Konzentrationen von wenigen Molekülen pro Million Luftmoleküle nachzuweisen. Das Besondere daran: Er verfügt über gleich drei Sensortypen, die mit bestimmten Polymeren beschichtet sind. An diese lagern sich Gasmoleküle aus der Luft an und beeinflussen so die Eigenschaften des jeweiligen Sensors: Der erste ist ein Mikrokondensator und misst die Änderungen in der elektrischen Kapazität. Mit einer winzigen Blattfeder aus Silizium registriert der zweite die Massenänderung bis auf weniger als ein Pikogramm (milliardstel Milligramm) genau. Schließlich bestimmt ein Temperaturfühler die Wärme, die frei wird, wenn sich Gasmoleküle anlagern. Gemeinsam erzeugen die drei Sensoren Signalmuster, anhand derer sich ein flüchtiger Stoff eindeutig identifizieren lässt. (*Nature, Bd. 414, S. 293*)


HIERLEMANN ET AL. / ETH ZÜRICH

Dieser Mikrochip riecht viele Schadstoffe schon in winzigsten Mengen.

MEDIZIN

Erziehung zur Toleranz

Damit die Abwehrzellen unseres Immunsystems nicht versehentlich körpereigenes Gewebe angreifen, müssen sie sicher zwischen „fremd" und „selbst" unterscheiden können. Dazu lernen die wichtigsten von ihnen, die „T-Zellen", während ihrer Reifung in der Thymus-Drüse all jene Proteine zu ignorieren, die der Körper selbst herstellt. Die meisten dieser Eiweißstoffe gelangen über den Blutkreislauf in den Thymus – nicht aber diejenigen aus Organen wie dem Zentralnervensystem, das durch die Bluthirnschranke vom Kreislaufsystem getrennt ist. Wie T-Zellen auch diesen Proteinen gegenüber Toleranz lernen, haben Bruno Kyewski und sein Team am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg nun herausgefunden: Eine Gruppe von Thymuszellen produziert Eiweißstoffe, die in dieser Drüse sonst nicht vorkommen und eher für Organe wie das Zentralnervensystem typisch sind. „Der Thymus stellt weit gehend", so Kyewski, „ein Abbild der Proteinausstattung des gesamten Körpers dar." Dies ist wichtig für Krebsforscher, die das Immunsystem darauf trainieren möchten, Tumorzellen anzugreifen. Als „Scharfmacher" sollten sie nur solche Tumorproteine wählen, die nicht auch im Thymus nachweisbar sind. (*Nature Immunology, Bd. 2, S. 1032*)

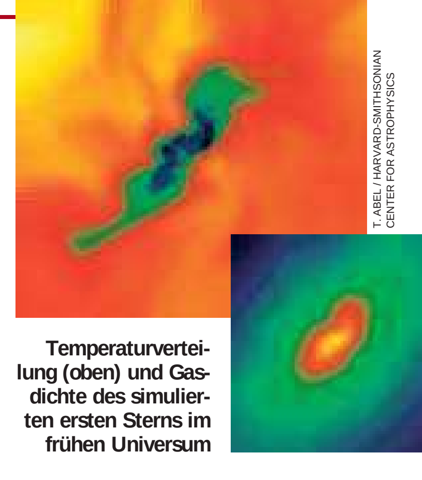
HALBLEITERPHYSIK

Blitzschnell abgeschirmt

Ein Teilchen bleibt selten allein, schon gar nicht, wenn es geladen ist. So sind negative Elektronen in einem Halbleiter innerhalb eines winzigen Augenblicks von positiv geladenen Löchern umgeben und bilden dann so genannte Quasiteilchen, die sich ganz anders verhalten als nackte Elektronen. Nun ist es Physikern an der Technischen Universität München unter Leitung von Andreas Leitenstorfer gelungen, den bislang für unmessbar kurz gehaltenen Vorgang doch zu beobachten: In nur siebzig Femtosekunden (billiardstel Sekunden) werfen sich die Elektronen demnach „einen Mantel aus positiven Löchern um". Die Münchner Physiker erzeugten zunächst mit einem ultrakurzen Laserpuls von nur wenigen Femtosekunden Dauer in einem Galliumarsenid-Kristall ein dichtes Plasma aus Elektronen und Löchern. Ein zweiter Laserblitz – mit anderer Wellenlänge, sodass er nicht ebenfalls vom Halbleiter absorbiert wurde – durchquerte den Kristall kurz darauf. Aus den zeitlichen Änderungen seiner Amplitude und Phase ließ sich auf die Ladungsverteilung und auf die Quasiteilchen schließen, die sich im Plasma bildeten. Zu verstehen, wie diese Abschirmung genau vor sich geht und wie sie den Quasiteilchen ihre besonderen Eigenschaften verleiht, ist eine zentrale Frage bei der Entwicklung von elektronischen Hochgeschwindigkeits-Bauelementen oder neuartigen quantenelektronischen Bauteilen. *(Nature, Bd. 414, S. 286)*

ASTROPHYSIK

Die Geburt der ersten Sterne



T. ABEL / HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS

Temperaturverteilung (oben) und Gasdichte des simulierten ersten Sterns im frühen Universum

Die ersten Sterne im Universum waren vermutlich riesige Einzelgänger. Das folgt zumindest aus den Computersimulationen, die Tom Abel vom Harvard Smithsonian Center for Astrophysics und seine Kollegen durchgeführt haben. Erst mit einem neuen Superrechner am National Center for Supercomputing Applications in Illinois gelang es ihnen, das Zusammenballen der ersten Wolken aus Wasserstoff und Helium auf Längenskalen von mehreren tausend Lichtjahren bis hin zu hundert Sonnendurchmessern zu simulieren. Ihr Ergebnis widerspricht bisherigen Theorien, wonach riesige Schwarze Löcher oder Kugelsternhaufen das frühe Universum bevölkerten. Stattdessen entstanden offenbar kurzlebige Riesensterne, mehrere hundert Mal so groß wie unsere Sonne. Diese schleuderten ihre Materie jeweils schon bald in einer gewaltigen Supernova-Explosion ins All. Nur so lässt sich nach Ansicht der Astrophysiker um Abel auch verstehen, warum im Universum bereits nach wenig mehr als einer Milliarde Jahren weiträumig schwerere Elemente als Wasserstoff und Helium vorkamen. Sie verraten sich durch Absorptionslinien im Spektrum des intergalaktischen Mediums und von Quasaren. *(Science, 10.1126/science.1063991)*

PALÄONTOLOGIE

Enkel von *Archaeopteryx*

Ein kürzlich entdecktes Fossil aus der chinesischen Provinz Liaoning stammt von dem bislang zweitältesten bekannten „Urvogel". *Sapeornis chaoyangensis* lebte vor etwa 135 Millionen Jahren – nur rund 15 Millionen Jahre nach *Archaeopteryx*. Bei der genauen Untersuchung des Fossils fanden Zhonghe Zhou und Fucheng Zhang von der chinesischen Akademie der Wissenschaften eine Reihe vogeltypischer Merkmale. So sind die Hinterbeine relativ kurz, während die sehr langen Vorderextremitäten verschmolzene Mittelhandknochen und einen deltaförmigen Knochenkamm auf dem Oberarmknochen aufweisen, an dem offenbar die Flugmuskulatur ansetzte. Am interessantesten ist die Entdeckung eines „Pygostyls": des zu einem einheitlichen Knochenstück verwachsenen letzten Schwanzwirbels der Vögel, an dem die Steuermuskeln des Schwanzes ansetzen und einen stabilen und gewandten Flug gewährleisten. *Archaeopteryx* fehlte dieser Stabilisator noch. Das zu vermutende gute fliegerische Können von *Sapeornis* zeigt, dass die Evolution der Vögel zu Beginn der Kreidezeit schon überraschend weit fortgeschritten war. Bisherige Fossilien hatten eine spätere Entwicklung dieser Tiergruppe nahe gelegt.



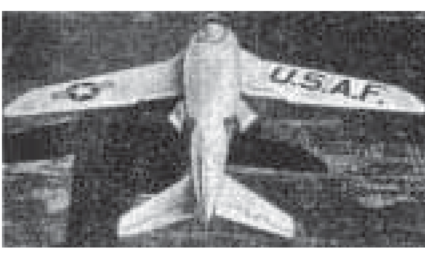
ZHONGHE ZHOU

Rekonstruierter Urvogel *Sapeornis chaoyangensis*

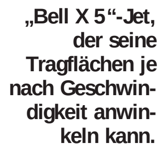


Verstellbare Pfeilflügel

Da sich jedes Überschallflugzeug beim Start und bei der Landung auch im Geschwindigkeitsbereich unter der Schallgeschwindigkeit bewegt, wirken sich die Pfeilformen der Flügel ungünstig aus. … Der mangelnden Anpassung des Pfeilwinkels hilft die schon durch ihr Raketenflugzeug X 1 bekannte Bell Aircraft Corp. ab, indem sie das Versuchsmuster X 5 mit einer Einrichtung versieht, die eine Verstellung der Tragflächen während des Fluges durch einen elektrischen Antrieb gestattet. Dadurch wird die Pfeilung den … Strömungsverhältnissen zumindest grob angepaßt. Von dieser Einstelleinrichtung verspricht man sich eine Verbesserung der Flugleistungen und eine Erhöhung der Flugsicherheit. *(Umschau, Heft 1, 1952, S. 27)*







„Bell X 5“-Jet, der seine Tragflächen je nach Geschwindigkeit anwinkeln kann.

Neue Giganten unter den Primzahlen

Unlängst teilten zwei englische Mathematiker aus Cambridge einige neue Primzahlen mit, die sie mit der elektronischen Rechenmaschine EDSAC bestimmt haben. Sie fanden die Primzahlen $934(2^{127}–1)+1$; $978(2^{127}–1)+1$; $180(2^{127}–1)^2+1$. Allerdings bemerkte Wheeler …, daß es etwa zur gleichen Zeit dem Franzosen A. Ferrier gelungen ist, mit einer gewöhnlichen Tischrechenmaschine die Zahl $(2^{148}+1)/17$ als Primzahl zu identifizieren, die damit die zweitgrößte der nun bekannten Primzahlen ist. So wird an dieser Stelle die Überlegenheit moderner Rechenhilfen noch nicht deutlich. *(Physikalische Blätter, 8. Jg., Heft 1, 1952, S. 28)*

Erstmals Strom aus Atomenergie

Vor kurzem wurde, wie die Atomenergiekommission in USA bekanntgibt, erstmals von amerikanischen Wissenschaftlern elektrischer Strom aus Atomenergie gewonnen. In der Reaktor-Versuchsstation in Arco (Idaho) seien über 100 kW Strom erzeugt und zum Betreiben von Pumpen, Aggregaten und anderen elektrischen Einrichtungen der Station benutzt worden. Man habe Hitze und Energie mit Hilfe von flüssigem Metall aus dem Reaktor entnommen, und zwar bei einer so hohen Temperatur, daß Dampf für den Antrieb einer Turbine gewonnen werden konnte. Man hoffe, daß sich … die gewonnenen Erfahrungen als nützlich für den künftigen Bau von Reaktoren erweisen, die Elektrizität zu wirtschaftlich tragbaren Kosten erzeugen sollen. *(Das Industrieblatt, 52. Jg., Nr. 1, 1952, S. 31)*

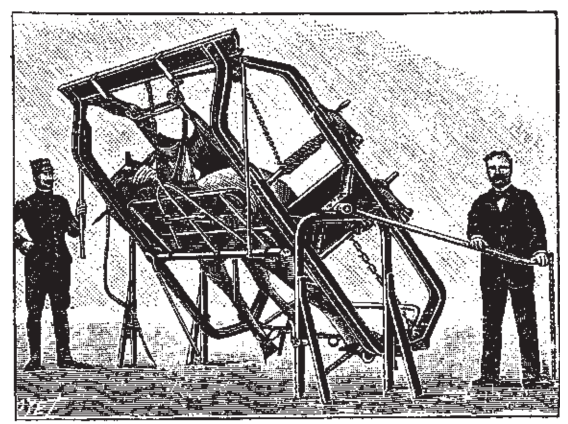


Bakterien bei tiefen Temperaturen

Elf Bakterienarten wurden 20 Std. lang einer Temperatur von –182 bis 190 °C ausgesetzt. Nach dem Auftauen zeigte sich in keinem Falle, gleichgiltig ob zur Kühlung feste oder flüssige Substanzen verwendet worden waren, irgend eine Beeinträchtigung der Lebensfähigkeit. Bei einem andern Versuch wurden die Erreger nicht der Temperatur der flüssigen Luft ausgesetzt, sondern in einem hermetisch verschlossenen Raum 7 Tage lang in einer Temperatur von –190°C gehalten. Auch hier hatten sämtliche Bakterien ihre volle Lebensfähigkeit behalten. *(Gesundheits-Ingenieur, 25. Jg., No. 2, 1902, S. 33)*

Ein Apparat zur chirurgischen Behandlung der Pferde

Es ist erklärlicherweise erheblich schwieriger, … ein Pferd, mithin ein trotz aller gerühmten Klugheit unvernünftiges Tier, zu behandeln als einen Menschen. Viele berühmte Tierärzte haben sich um Apparate zur Unterstützung der Chirurgen verdient gemacht. Der beste existierende Operationsapparat dieser Art soll derjenige des Veterinärarztes Binsot sein … Zwischen zwei feststehenden starken Tragböcken ruht auf zwei Drehzapfen ein großer eigentümlich geformter Rahmen, der das zu operierende Pferd aufzunehmen und in jeder beliebigen Lage unbeweglich festzuhalten hat, ohne daß die Muskeln des Tieres bei dieser Tätigkeit angestrengt werden. *(Das Neue Universum, 23. Jg., 1902, S. 221)*



Operationsmaschine für Pferde

Die Schnellfahrversuche für elektrische Bahnen

Wie bekannt, hat sich in Berlin eine Gesellschaft zu dem Zwecke gebildet, festzustellen, welche Einrichtungen sowohl an der Bahn als auch an den Fahrzeugen getroffen werden müssen, wenn die Geschwindigkeit der letzteren erheblich über die bisher eingehaltenen Grenzen hinaus gesteigert werden soll. Als höchste anzustrebende Geschwindigkeit waren dabei 200 km angenommen. … Mit Versuchsfahrten ist nun im September dieses Jahres begonnen worden. Sie fanden zunächst unter Vorspann einer Locomotive statt, um die Wagen einzufahren … Alsdann fanden einige Fahrten statt, bei denen für kurze Zeit die Höchstgeschwindigkeit von 150 km, in einem Falle sogar 160,2 km erreicht wurde – das sind Geschwindigkeiten, mit denen bisher noch niemals ein Mensch gefahren ist. *(Oesterreichische Eisenbahn-Zeitung, No. 1, XXV. Jg., 1902 S. 12)*

Hilfe bei der Geburt

Hebammen in der Evolution des Menschen

Schon seit mehreren Millionen Jahren gebären Frauen vermutlich ungern alleine. Denn der aufrechte Gang und das große Gehirn des Menschen machten die Geburt so schwierig, dass Beistand die Gefahren für Mutter und Kind erheblich mindert.

Von Karen R. Rosenberg und Wenda Trevathan

Noch liegt Nebel über den Hütten. Leise zerteilen einsame Schritte die Stille. Im ersten Morgengrau taucht die Silhouette einer jungen hochschwangeren Frau auf. Schwerfällig bahnt sie sich einen Weg aus dem Dorf in den nahe gelegenen Wald. Wie es bei ihrem Volk Sitte ist, wird sie sich einen geschützten Platz suchen und ihr Baby zur Welt bringen – allein. Nach einigen Stunden wird sie zurückkehren und dem stolzen Vater das Neugeborene in die Arme legen.

So romantisch geht es in Wirklichkeit fast nirgends zu. Nur Bücher und Filme verklären die Geburt bei Naturvölkern: In der Fantasie der Autoren gebären Frauen in ursprünglichen Gesellschaften leicht und ohne fremde Hilfe. Der wissenschaftliche Befund lautet völlig anders. Nach Erkenntnissen von Anthropologen lassen sich heutzutage die Frauen aller Kulturen nach Möglichkeit bei der Entbindung helfen. Selbst bei den !Kung, Buschleuten der Kalahari, bei denen die einsame Geburt als kulturelles Ideal gilt, bleibt die Gebärende selten auf sich allein gestellt. Mutter, Schwestern und andere erfahrene Frauen leisten ihr Beistand. Erst wenn eine !Kung-Frau schon mehreren Kindern das Leben geschenkt hat, vermag sie auch ohne fremde Hilfe zu entbinden.

Hinderlicher aufrechter Gang

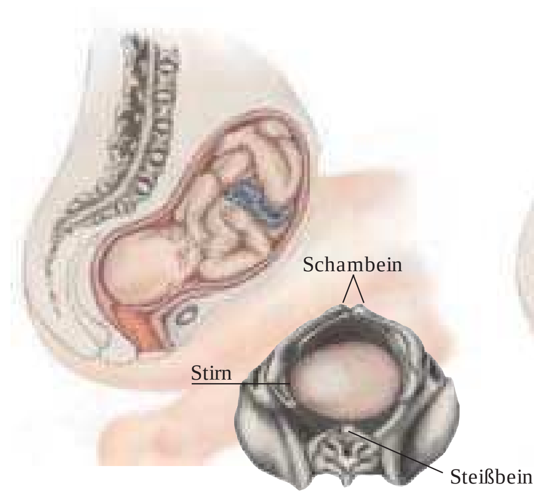
„Unter Schmerzen sollst du deine Kinder gebären“ – lautete Gottes Strafe für Eva und ihre weiblichen Nachkommen nach dem Sündenfall. Dennoch wünschen und benötigen Frauen Beistand bei der Niederkunft nicht nur wegen der Schmerzen. Denn eine Geburt ist tatsächlich aus anatomischen Gründen heikel – der Preis für unser großes Gehirn, das sich beim Gebären schwer mit den anatomischen Anforderungen des aufrechten Gangs verträgt. Dieser bestimmt die Form unseres Beckens. Dem Geburtskanal setzt die aufrechte Gehweise nicht nur buchstäblich enge Grenzen, sondern macht ihn auch in sich gewunden. Das zwingt den Säugling, auf seinem Weg ans Licht der Welt bestimmte komplizierte Drehungen zu vollführen.

Obwohl dies lange bekannt ist, begreifen Anthropologen erst jetzt, dass unsere Vorfahren sicherlich schon in Urzeiten mit Komplikationen bei der Geburt zu kämpfen hatten. Rekonstruiert man den Geburtskanal an hominiden Fossilien, so dürften Frauen dabei seit mindestens 100 000 Jahren Hilfe beansprucht haben. Vielleicht wurde Geburtshilfe sogar noch viel früher in der menschlichen Evolution praktiziert, obwohl damals das Gehirn noch nicht so groß war. Als vor über zwei Millionen Jahren die Gattung *Homo* auftrat, könnte es sie bereits gegeben haben, vielleicht sogar schon, seitdem die ersten Hominiden vor etwa fünf Millionen Jahren den aufrechten Gang erwarben und das Becken sich deswegen verändert hatte. Wir vermuten, dass der Wunsch einer Gebärenden nach Beistand sich in unserer Stammlinie recht früh einpflanzte, und dass seine Ursache nicht nur die soziale Natur des Menschen ist. Auch dies unterscheidet uns von unseren nächsten Primatenverwandten.

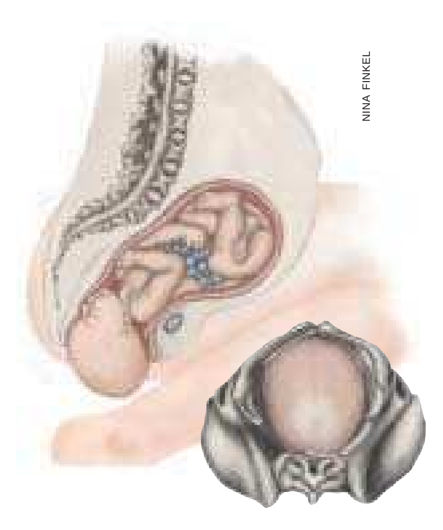
Bei einem Neugeborenen unserer Tage ist der Kopf von oben betrachtet oval, mit dem längsten Durchmesser von der Stirn zum Hinterkopf, und hinten etwas dicker. In der Längsachse misst er durchschnittlich zehn Zentimeter. Quer ▶

Dieses lebensgroße Wachsmodell einer Zangengeburt ließ der berühmte italienische Anatom Paolo Mascagni (1755 – 1815) fertigen, der in Siena lehrte.


AKG BERLIN







Das Kind muss sich im Geburtskanal drehen. Weil es mit dem Gesicht zum Rücken der Mutter zur Welt kommt, ist es für die Gebärende schwierig, ihm selbst aus dem Geburtskanal zu helfen.

dazu steht der Schultergürtel, mit zwölf Zentimetern etwas sperriger, aber auch beweglicher. Die ovale Beckenöffnung der Mutter misst durchschnittlich 13 mal 10 Zentimeter. Sie bietet damit dem Säugling im Prinzip ausreichend Raum, wenn auch Kopf und Schultern nicht gleichzeitig hindurchpassen.

Hinzu kommt aber, dass der Querschnitt des Geburtskanals variiert. Im oberen Abschnitt, hin zur Gebärmutter, erstreckt sich die längste Achse des Ovals im Becken von rechts nach links. In der Mitte des Kanals dreht sie sich um neunzig Grad. Nun weist die längere Achse vom Bauch zum Rücken, wobei die bauchwärts gelegene Seite etwas mehr Raum bietet.

Das Kind muss während der Geburt also Kopf und Schultern stets in die jeweils günstigste Richtung bringen. Wenn es in den Geburtsweg eintritt, schaut das Gesicht zur Seite. Später muss es das Gesicht zum mütterlichen Rücken drehen, sodass der etwas breitere Hinterkopf an das Schambein gepresst wird. Die Schultern liegen nun in der Mutter quer. Sobald der Kopf ins Freie kommt, dreht das Kind ihn wieder etwas zur Seite, womit auch die Schultern in die günstigere Lage zwischen Steißbein und Schambein rutschen.

Gedrehter Geburtskanal und großer Kopf

Aber nicht nur diese Drehungen im engen Geburtskanal machen den Vorgang heikel. Hinzu kommt, dass es für die Mutter schwierig ist, selbst einzugreifen. Egal, ob sie bei der Geburt hockt, sitzt oder liegt: Wollte sie das Kind eigenhändig herausziehen, bestünde die Gefahr, dass die kindliche Wirbelsäule gegen deren natürliche Krümmung gebogen würde und das Neugeborene Verletzungen an Rückenmark, Nerven oder Muskeln erlitte. Auch wäre es für die Mutter alles andere als einfach, gleich selbst die Atemwege des Kindes zu reinigen oder es gar von einer um den Hals gewickelten Nabelschnur zu befreien. Solange der Säugling noch mit der Nabelschnur verbunden ist, vermag sie ihn nicht einmal ohne weiteres an die Brust zu holen.

Andere Primaten haben es leichter. Zwar besitzen auch deren Neugeborene einen ovalen Kopf, der bei vielen Arten knapp durch die Geburtsöffnung passt. Doch der ebenfalls im Querschnitt ovale Geburtskanal verwindet sich nicht.

Wann in unserer Stammesgeschichte mag sich das geändert haben? Als Modell für die Verhältnisse bei direkten Vorfahren des Menschen, die beim Gebären noch nicht Hilfe in Anspruch nahmen, eignen sich unter den heute lebenden Primaten weniger die Menschenaffen. Mit denen sind wir zwar am engsten verwandt. Doch um sich den Geburtsvorgang bei vormenschlichen Primaten vorzustellen, sollte man besser Tieraffen, also etwa Paviane oder Rhesusaffen, zum Vergleich heranziehen.

Schließlich stammen wir nicht von den heutigen Menschenaffen ab, sondern wir haben mit ihnen nur gemeinsame Vorfahren. Die Vorfahren der Menschenaffen haben später ihre eigenen Entwicklungen durchgemacht. Ein potenzieller Vorfahre des Menschen, der vor rund 25 Millionen Jahren lebende *Proconsul*, ähnelte zwar äußerlich den heutigen Menschenaffen. Er besaß etwa keinen Schwanz mehr. Nach seinem Skelettbau bewegte er sich jedoch eher wie ein Tieraffe. Auch sein Becken glich stärker dem eines Tieraffen.

Bei Schimpansen lässt der Geburtskanal dem Jungen vergleichsweise viel Raum. Bei Tieraffen hingegen sind die Verhältnisse eng: Typischerweise passt der Kopf gerade noch hindurch.

Allerdings muss das Affenjunge sich nicht drehen, denn der Kanal behält seine Form im Querschnitt von Anfang bis Ende bei. Die längere Achse des Ovals zieht von vorn nach hinten, vom Bauch zum Rücken der Mutter.

Unter diesen Umständen verläuft eine Geburt normalerweise glatt: Während der Niederkunft hockt sich die Affenmutter hin oder kauert sich auf alle Viere. Die Wehen pressen den Säugling dann mit

Literaturhinweise

On Fertile Ground: A Natural History of Human Reproduction. Von Peter T. Ellison. Harvard University Press, 2001.

Bipedalism and Human Birth: The Obstetrical Dilemma Revisited. Von Karen R. Rosenberg und Wenda Trevathan in: Evolutionary Anthropology, Bd. 4 S. 161, 1996.





*Die Paläoanthropologin **Karen R. Rosenberg** (oben) von der University of Delaware erforscht die Evolution der menschlichen Geburt. Sie ist auf die Morphologie von Beckenknochen spezialisiert und hat Hominidenfossilien aus Europa, Israel, China und Südafrika untersucht. Das wissenschafliche Interesse der Anthropologin **Wenda Trevathan** von der New Mexico State University gilt vor allem der Geburt, dem Verhalten von Müttern, der Sexualität, den Wechseljahren sowie der Entwicklung heilender Verfahren in der Evolution.*



dem Kopf voran in den Kanal, wobei der breite Hinterschädel durch den etwas geräumigeren Bereich zwischen Becken und Steißbein der Mutter rutscht. Auf diese Weise kommt das Affenbaby mit dem Gesicht nach vorn auf die Welt, blickt also in die gleiche Richtung wie die Mutter.

Sobald der Kopf herausschaut, greift die Affenmutter nach dem Jungen und hilft ihm ins Freie. Sie zieht es zu sich, und oft wischt sie ihm Schleim vom Gesicht und erleichtert ihm so das Atmen. Die Affenkinder selbst sind kräftig genug, ins Fell der Mutter zu greifen, sobald ihre Hände frei sind, und sich allein aus dem Geburtskanal herauszuziehen.

Für Menschenfrauen wäre vieles leichter, wenn auch ihre Babys mit dem Gesicht nach vorn zur Welt kämen. Doch unter den gegebenen Umständen verrichten andere Personen all das, was eine Affenmutter alleine erledigt. Hebammen ersetzen außerdem Verhaltensweisen, zu denen das relativ hilflose menschliche Neugeborene nicht in der Lage ist. Man darf annehmen, dass Geburtshilfe seit jeher die Sterblichkeit von Mutter und Kind vermindert.

Sicher haben Frauen früher, wie auch heute noch, allein geboren. Dies dürften aber seit jeher eher Ausnahmen gewesen sein. Es kann gut sein, dass die Geburtshilfe in menschlichen Kulturen einem universalen Brauch gleichkommt.

Unseres Erachtens könnte das bedeuten, dass der Beistand bei der Geburt in der menschlichen Stammlinie ziemlich alte Wurzeln hat. Ein derart komplexes Verhalten lässt sich an Fossilien zwar nicht direkt ablesen. Man kann aber an fossilen Skeletten den Geburtsablauf rekonstruieren – und daraus Schlüsse ziehen –, sofern man die Größenverhältnisse des Beckens der Frau und des kindlichen Kopfes kennt oder errechnen kann.

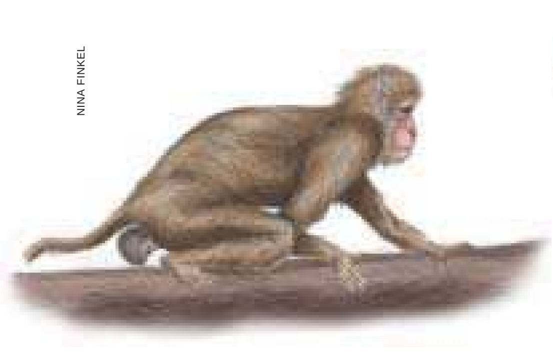
Für die meisten Epochen der menschlichen Evolution ist die Anatomie des Beckens mittlerweile bekannt. Die Maße der Säuglingsköpfe lassen sich nach den Schädeldaten Erwachsener abschätzen. Denn während Schädel von erwachsenen Individuen in größerer Zahl existieren, sind die zarten Knochen von Neugeborenen gewöhnlich erst überliefert, seit Menschen vor etwa 100 000 Jahren ihre Toten zu bestatten begannen. Anhand solcher Daten und Berechnungen gingen wir und andere Forscher auch der Frage nach, ob die Kinder früher Hominiden mit dem Gesicht nach vorne oder nach hinten zur Welt kamen. Mit solchen Ergebnissen lässt sich abschätzen, wie schwierig und riskant die Geburt in den einzelnen Phasen unserer Evolution war – ob die Mütter sie allein bewältigen konnten oder Hilfe in Anspruch nehmen mussten.

Schwere Geburt schon bei Vormenschen

Am Beginn der menschlichen Evolution spielte eine zunehmende Schädelgröße noch keine besondere Rolle – das Gehirn vergrößerte sich erst später so auffallend. Den ersten entscheidenden Schritt, der auf den Ablauf der Geburt bereits beträchtlichen Einfluss hatte, stellte vielmehr der Übergang zum aufrechten Gang dar. Die Abkehr von der für Primaten typischen Niederkunft dürfte mit dem Erscheinen der Gattung *Australopithecus* vor rund vier Millionen Jahren zusammenfallen. Diese frühen afrikanischen Hominiden wurden nur etwa 1,20 Meter groß. Ihre Gehirne hatten nur wenig mehr Volumen als die heutiger Schimpansen. Doch wandelten sie bereits auf zwei Beinen.

Welche von den verschiedenen *Australopithecus*-Arten zur direkten Stammlinie des Menschen gehören, ist nicht sicher. Trotzdem sind Daten über ihre Beckenanatomie aufschlussreich, auch wenn diese von einer etwas abseits stehenden Art stammen sollten. Denn bei der gesamten Gruppe dieser Hominiden dürfte der aufrechte Gang die Größe von Becken und Geburtskanal in ähnlicher Weise verändert und begrenzt haben.

Wie das Becken weiblicher Australopithecinen aussah, verraten zwei komplett erhaltene weibliche Skelette. Eines, als „Sts 14“ katalogisiert, stammt von Sterkfontein in der südafrikanischen Region Transvaal. Sein Alter wird auf zweieinhalb Millionen Jahre geschätzt. Bei dem zweiten handelt es sich um die berühmte Lucy aus der Hadar-Region in Äthiopien, die etwas über drei Millionen Jahre alt sein dürfte. Beide Skelette lassen erahnen, dass die Geburt bei diesen frühen Hominiden vollkommen anders ablief als bei allen heutigen Primaten einschließlich des Menschen. Das folgerten C. Owen Lovejoy von der Kent State University (US-Bundesstaat Ohio) und Robert G. Tague von der Louisiana State University mit Hauptsitz in Baton Rouge. Mitte der achtziger Jahre untersuchten diese Anthropologen beide Fossilien und verglichen die Daten mit der geschätzten Schädelgröße damaliger Neugeborener (siehe „Die Evolution des ▶







NINA FINKEL

Affenkinder werden mit zum Bauch der Mutter gerichtetem Gesicht geboren. Diese kann das Junge daher selbst aus dem Geburtskanal führen und ihm Mund und Nase reinigen, um die Atmung zu erleichtern.

aufrechten Gangs“ von C. Owen Lovejoy, SdW 10/89, S. 92).

Der Geburtskanal der Australopithecinen war nämlich ein auffallend flaches Oval, dessen Längsachse nicht – wie sonst bei Primaten – vom Bauch zum Rücken zeigte. Vielmehr erstreckte diese Achse sich von einer Körperseite zur anderen. Der Kanal war nicht in sich gedreht. Das heißt, das Kind konnte mit dem Kopf glatten Weges hindurchtreten, und zwar in Seitenlage. Wir vermuten aber, dass es zumindest den Kopf drehen musste, sobald der ins Freie kam, damit zuletzt auch die Schultern durchpassten.

Hierdurch gerieten die Australopithecinen oft in eine Situation, die bei Primaten bisher nicht da gewesen war: Genauso gut wie nach vorn zur Mutter konnte das Gesicht des Kindes am Ende nach hinten schauen. Wegen der anatomischen Verhältnisse war die Richtung der Drehung praktisch beliebig. Zeigte das Gesicht aber zufällig nach hinten, brachte das die Frau womöglich in eine prekäre Lage. Vermutlich war es für sie und ihr Kind dann vorteilhaft, wenn nun andere Frauen geschickt zugriffen. Geburtshilfe könnte darum schon bei den Australopithecinen vorgekommen sein.

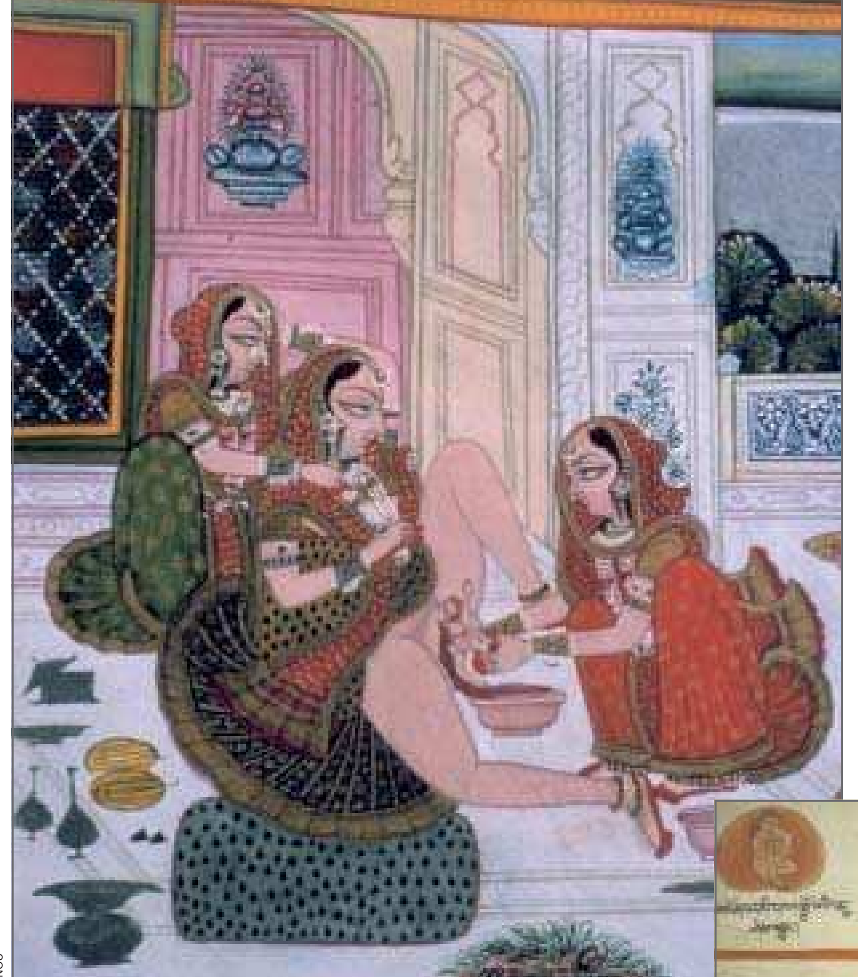
Als hätte der aufrechte Gang die Geburt nicht schon genügend verkompliziert, bereitete das größer werdende Gehirn zusätzliche Probleme. Eine nennenswerte Gehirnzunahme setzte erst in der Gattung *Homo* ein, mehrere Millionen Jahre nachdem die Vorfahren des Menschen sich aufgerichtet hatten.

Einigermaßen vollständig erhaltene fossile Skelette früher *Homo*-Arten sind selten. Das kompletteste Exemplar, das gut 1,5 Millionen Jahre alte Nariokotome-Fossil aus Kenia, gehörte einem Halbwüchsigen, der häufig als Turkana-Junge bezeichnet wird. Wissenschaftler schätzen, dass dessen erwachsene Zeitgenossen bereits ein ungefähr doppelt so großes Gehirn hatten wie Australopithecinen. Es erreichte damit rund zwei Drittel unserer Gehirnmasse.

Großes Gehirn erst dank Hebammen

Christopher B. Ruff von der Johns Hopkins University in Baltimore (US-Bundesstaat Maryland) und Alan Walker von der Pennsylvania State University haben aus den fossilen Fragmenten die Form des Beckens rekonstruiert und hochgerechnet, wie sie wohl bei einem Erwachsenen ausgesehen haben mag. Aus den deutlichen Unterschieden männlicher und weiblicher Beckenform späterer Menschenarten erschlossen die Forscher, wie Becken und Geburtskanal von Frauen im Umfeld des Turkana-Jungen geformt waren. Danach musste das Kind ein abgeflachtes Oval durchqueren, das sich zu den Beckenseiten hin streckte, so wie bei den Australopithecinen. Ruff und Walker vermuteten, dass auch die Geburt in vergleichbarer Weise ablief.

Diese Beobachtung brachte eine interessante Hypothese auf, der Wissenschaftler in den letzten Jahren nachgingen. Konnte es sein, dass in unserer Evolution die Gehirnzunahme bei frühen *Homo*-Arten auf die Grenzen stieß, die der Geburtskanal wegen des aufrechten Gangs schon damals setzte? Der Kopf des Neugeborenen konnte nach diesen Überlegungen nur in dem Maße größer werden, wie auch das Becken in geeig-



AKG BERLIN / JEAN-LOUIS NOU

AKG BERLIN / WERNER FORMAN

Oben: eine indische, rajputische Miniatur aus dem 18. Jahrhundert. Rechts: Ausschnitt einer tibetischen Schriftrolle, die der medizinischen Lehre diente.

neter Weise geräumiger wurde. Bei den Australopithecinen war der Durchgang im Becken zwar ziemlich breit, aber zugleich sehr flach, sodass nur ein recht kleiner Kopf hindurchpasste.

Die Erweiterung des Geburtskanals und die Vergrößerung des Gehirns wären nach dieser These bei den frühen Menschen Hand in Hand gegangen. Das Gehirnvolumen konnte wachsen, indem das Becken sich so veränderte, dass ein größerer Kopf hindurchpasste, wenn auch nun auf gewundenem Wege. Hilfestellung beim Gebären war dazu vermutlich Voraussetzung. Die rasante Zunahme der Gehirngröße, die vor zwei Millionen einsetzte und bis vor 100000 Jahren anhielt, wurde nach diesen Überlegungen durch den Umbau des Beckens im Verein mit Geburtshilfe möglich. Fossilfunde stützen diesen Zusammenhang für die letzten 300000 Jahre. In den vergangenen zwanzig Jahren entdeckten Wissenschaftler drei Beckenskelette von archaischen *Homo sapiens*, die bereits ein sehr großes Gehirn besaßen:

➤ in Sima de los Huesos in der spanischen Sierra Atapuerca über 200000 Jahre alte Fossilien eines Mannes;
➤ im chinesischen Jinniushan 280000 Jahre alte weibliche Skelettreste;
➤ in Israel die rund 60000 Jahre alten Knochen eines Mannes – des Kebara-Neandertalers.

Bei allen Dreien hat das innere Becken die gleiche Drehung wie beim modernen Menschen. Dies deutet darauf hin, dass die Kinder höchstwahrscheinlich schon damals im Geburtskanal Kopf und Schultern drehen mussten. Im Augenblick der Geburt schaute das Gesicht nach hinten, was es der Mutter schwer machte, allein zurechtzukommen.

Auch wenn eine Geburt beim Menschen schon aus anatomischen Gründen alles andere als trivial ist: Wir vermuten dennoch, dass in unserer Evolution der Wunsch der Gebärenden nach Beistand nicht nur deswegen aufkam. Wahrscheinlich lösten Schmerz und Angst auch das seelische Bedürfnis aus, nicht allein zu sein und jemanden um sich zu haben, dem man vertrauen kann und der im Notfall Hilfe leistet.

Ähnliche Gefühle erleben Menschen auch bei Krankheiten und Verletzungen. Psychologen und Anthropologen vermuten, dass sich solche Empfindungen mit unserer Evolution herausbildeten – wie auch auf der anderen Seite die Bereitschaft zu helfen. Denn die willkommene Hilfestellung bietet einen Selektionsvorteil: Stehen Artgenossen einem Individuum in Not zur Seite, steigen seine Überlebenschancen (siehe auch „Der evolutionäre Ursprung von Krankheiten“, SdW 1/99, S. 38). Dies gilt auch für Mutter und Kind. Wohl nicht von ungefähr erleben Frauen, die ein Kind zur Welt bringen, solche Gefühle in starkem Maße.

Gebärende unserer Zeit haben als Vermächtnis unserer Stammesgeschichte also gleich zwei Gründe, um Beistand zu ersuchen: Sie und das Kind benötigen physisch Hilfestellung, aber sie fühlen auch den starken Wunsch, während der Strapazen der Geburt nicht allein gelassen zu sein. Dies mag vielleicht weniger romantisch klingen als die Geschichten von einsam Gebärenden. Das komplexe Wechselspiel zwischen der Anatomie des aufrechten Ganges und den Anforderungen eines großen Gehirns ist dennoch faszinierender als verklärte Romanerzählungen. Und entgegen anders lautenden Behauptungen ist vielleicht der Beruf der Hebamme das älteste Gewerbe der Welt. ■

Studie über das Geburtserleben

Der Schmerzbewältigung bei Wehen auf der Spur

Eine Geburt kann höllische Schmerzen verursachen. Um die Beschwerden während der Wehen zu lindern, probieren werdende Mütter auf der ganzen Welt alles Mögliche aus. Sie legen sich auf Tennisbälle, meditieren, lassen sich durchs Fernsehen ablenken oder vertrauen auf Schmerzmittel der modernen Medizin. Schwangere werden oft mit gut gemeinten Ratschlägen und brandneuen Forschungserkenntnissen überschüttet. Doch welche Methoden der Schmerzbewältigung helfen weltweit am besten, und wie bekannt sind sie bei Schwangeren? Das wollen Psychologen von der Universität Ohio jetzt mit einer internet-basierten Studie klären.

Im Oktober 2001 startete das Team um die Psychologin Janis France das Projekt, um mehr über Schmerzen und ihre Bewältigung bei der Geburt zu erfahren. Unter der Adresse www.laborpain.org oder www.labourpain.org können schwangere Frauen und Mütter nach der Geburt Fragebögen ausfüllen. Die Teilnehmerinnen werden gefragt, wie viele Schwangerschaften sie bereits hinter sich haben und wie sie sich auf die Geburt vorbereitet haben, etwa durch den Besuch von speziellen Kursen.

Schwangere sollen angeben, über welche Methoden der Schmerzbewältigung sie bereits informiert sind, wie sie diese Verfahren einschätzen und welche davon sie bei ihrer Entbindung einsetzen wollen – etwa, ob sie eine besondere Atemtechnik erlernt haben oder ob sie von Anfang an planen, zu schmerzstillenden Medikamenten zu greifen oder eine Periduralanästhesie vornehmen zu lassen, bei der ein Schmerzmittel zwischen zwei Wirbel gespritzt wird. Ferner sind persönliche Angaben zu Alter, früheren Schwangerschaften, der ethnischen Zugehörigkeit, Bildung und dem Lebensstandard erbeten.

Nach der Entbindung sollen sich die Teilnehmerinnen zurückmelden und einen ähnlichen Bogen ausfüllen, in dem sie angeben, wie die Geburt tatsächlich verlief und welche Strategien sie wie erfolgreich eingesetzt haben. Ferner werden die Teilnehmerinnen gefragt, in welcher Position sie sich die meiste Zeit während der Wehen befanden, ob sie auf dem Rücken oder auf der Seite lagen, saßen, hockten oder standen. Dazu kommen Fragen zur Beschreibung des Schmerzes: Wie haben sich die Wehen angefühlt? Frauen, die bereits entbunden haben, können ebenfalls teilnehmen; bei ihnen entfällt der erste Fragebogen. Um Missbrauch und falsche Angaben zu verhindern, bitten die Forscher die Teilnehmerinnen, ihre E-Mail-Adresse anzugeben.

Die Studie soll mindestens bis Oktober 2002 laufen. Schwangere und Mütter werden über das Internet und über die Medien über die Studie informiert. Die Psychologen arbeiten gerade an einer Übersetzung des Fragebogens ins Spanische; weitere Sprachen sollen folgen.

Julia Bidder
Wissenschaftsjournalistin in Saarbrücken



DR. BERZ / MAURITIUS

Geburtshilfe förderte wahrscheinlich schon die menschliche Evolution.

Molekulare Motoren

In der lebenden Zelle sind mikroskopische Maschinen am Werk, die durch Zufallsbewegungen und Quanteneffekte angetrieben werden. Wie schaffen es diese winzigen Aggregate, das umgebende Chaos in geordnete Bahnen zu lenken?

Von R. Dean Astumian

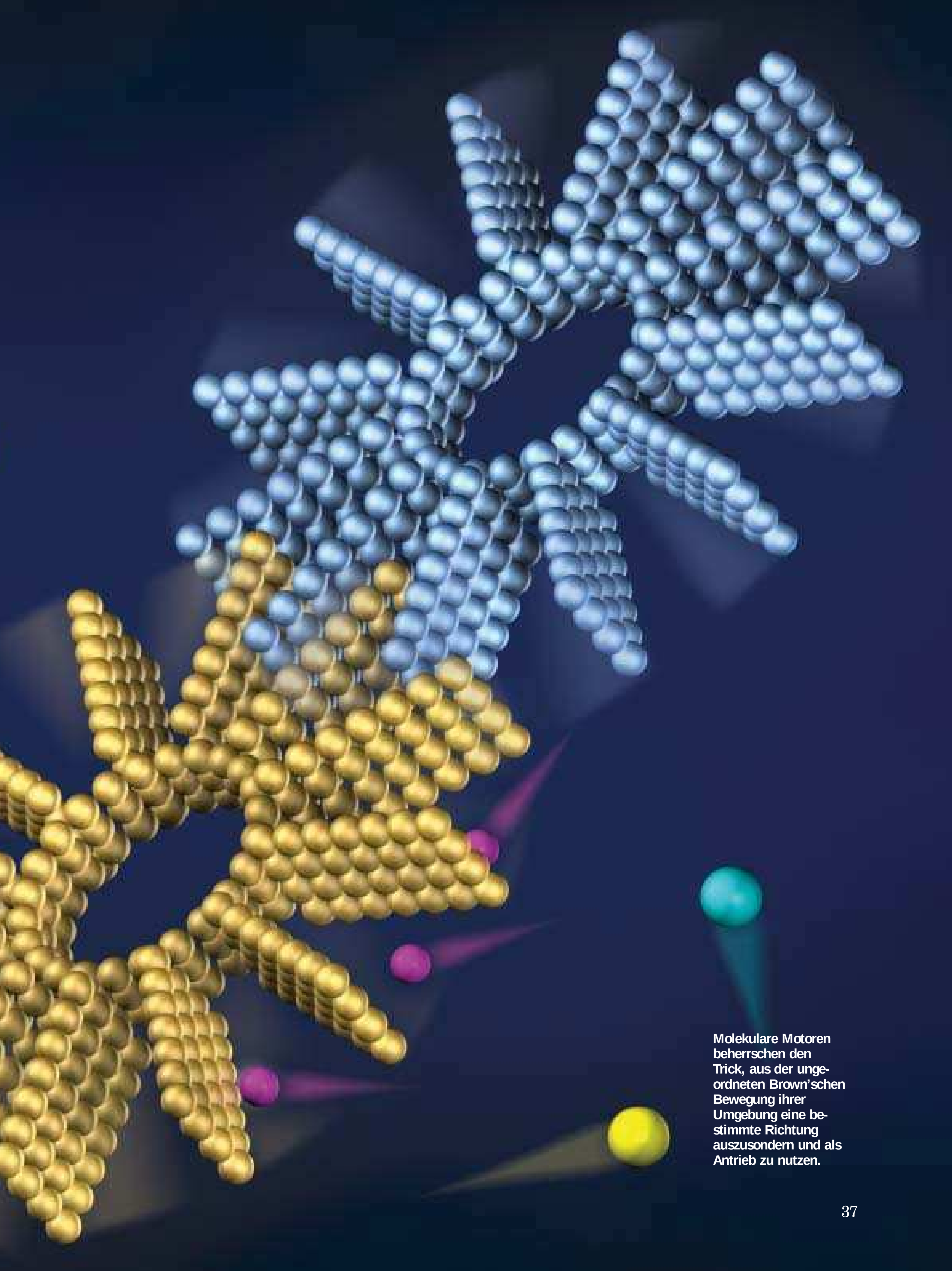
In den Lehrbüchern der Zellbiologie und Biochemie macht alles einen so schön geordneten Eindruck: Moleküle schweben gezielt aufeinander zu, gehen wohl definierte Bindungen ein und bleiben brav zusammen, bis sie unter Energieaufwand wieder getrennt werden. Doch dieses harmonische Bild, das aus unserer makroskopischen Vorstellungswelt stammt, hat wenig mit der Realität des Nanokosmos in lebenden Zellen gemein – denn dort herrschen Zufall und Chaos. Und dennoch wandern Zellen zum Licht, nehmen Zuckermoleküle aus der Umgebung auf und synthetisieren ständig Bausteine für neue Strukturen.

In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler allmählich erkannt, wie die Natur aus diesem scheinbaren Widerspruch einen Antrieb für molekulare Motoren gewinnt. Sie filtert gleichsam aus der thermischen Zufallsbewegung mikroskopischer Teilchen, der so genannten Brown'schen Molekularbewegung, mit einem Trick all das heraus, was nicht in die gewünschte Richtung geht. Das zu Grunde liegende Prinzip lässt sich als Brown'sche Ratsche veranschaulichen: Eine Feder drückt eine Sperrklinke in ein Zahnrad. Entscheidend ist dabei, dass die Zähne asymmetrisch geformt sind: Auf der einen Seite haben sie eine steile Flanke, auf der anderen geht es gemächlicher abwärts (Bild Seite 41).

Wissenschaftler haben in ihren Reagenzgläsern bereits Miniaturmotoren und -apparate hergestellt, die nach diesem Prinzip einzelne Moleküle manipulieren können. Wie ihre natürlichen Vorbilder setzen die winzigen Maschinen chemische Energie mit fast hundertprozentigem Wirkungsgrad in mechanische Arbeit um. In zukünftigen technischen Systemen könnten sie als molekulare Montagegeräte oder hyperfeine Siebe wirken, fast ohne Energiezufuhr Berechnungen durchführen oder die Qualität von Halbleiterstrukturen kontrollieren.

Noch sind das Zukunftsträume. Die Technik der Gegenwart ist meistens so klobig, dass sie mühelos mit bloßem Auge zu erkennen ist. Diese makroskopische Welt prägt unser Denken, und ▶


THOMAS BRAUN



Molekulare Motoren beherrschen den Trick, aus der ungeordneten Brown'schen Bewegung ihrer Umgebung eine bestimmte Richtung auszusondern und als Antrieb zu nutzen.

darum ist es hilfreich, sich die molekularen Vorgänge mit Modellen aus dem Alltag zu veranschaulichen. Beispielsweise steht ein Auto für ein Protein, das in eine bestimmte Richtung wandern soll, und die Hagelkörner eines heftigen Wintersturms übernehmen die Rolle der Wassermoleküle, die von allen Seiten auf das Eiweißmolekül einschlagen.

Um die Aufgabe noch schwieriger zu gestalten, parkt das Auto am Fuße eines Hügels, dessen Kuppe es erreichen soll. Unvorstellbar, dass es bei ausgestelltem Motor wie von selbst hochfährt. Aber mit Hilfe des Hagels ist genau das möglich. In jeder Sekunde hämmern hunderte Körner zufällig von allen Seiten gegen die Karosserie – ein Protein in der Zelle hat noch weit mehr Stöße einzustecken. Da die augenblicklichen Impulse sich nicht exakt aufheben, bewegen sie in ihrer Summe das Auto ein winziges Stückchen vor oder zurück. Über längere Zeit betrachtet bleibt das Fahrzeug zwar am Ausgangspunkt stehen, doch es zittert dabei hin und her.

Ein flinker Beobachter kann sich diese Bewegung zu Nutze machen. Wenn er ein Hinterrad mit einem Bremsklotz blockiert, unterbindet das jede Fahrt des Autos nach hinten. Schafft er es nun, den Klotz schnell genug nachzuschieben, wenn der Hagel den Wagen zufällig nach vorne treibt, macht er so nach und nach in winzigen Stücken Boden gut – und schließlich kommt das Auto tatsächlich oben auf dem Hügel an.

Der beschriebene Vorgang stellt freilich hohe Ansprüche an den „Fahrer“. Bequemer geht es mit der bereits erwähnten Ratsche anstelle einer gewöhnlichen Bremse. Dafür muss das asymmetrische Zahnrad auf einer Radachse sitzen und die Sperrklinke zwischen die Zähne greifen. Treffen mehr Hagelkörner von vorne auf das Auto, bleibt es stehen, da die Klinke gegen die steile Flanke des Zahnrads gedrückt wird. Erfährt hingegen das Heck ein stärkeres Bombardement, so schiebt die Vorwärtsbewegung des Wagens den Stift die sanft ansteigende Seite des Zahnrads empor.

Nur weil der Fahrer zufällig bremst, kommt das Auto voran

Ist der Impuls groß genug, springt der Stift schließlich in die nächste Kerbe und sichert automatisch den kleinen Raumgewinn. Sonderlich effektiv ist diese Art der Fortbewegung natürlich nicht, denn nur solche Hagelkörner schieben das Auto voran, die genug Energie mitbringen, um die Kraft der Feder an der Sperrklinke zu überwinden.

Eine verbesserte Konstruktion vermeidet diese Schwierigkeit. Das Zahnrad ist diesmal andersherum eingebaut, sodass die Klinke bei einer Vorwärtsbewegung vor dem Problem der steilen Flanke steht. Doch statt ständig zwischen den Zähnen zu stecken, schwebt der Haken die meiste Zeit darüber. Das Auto kann also frei vor- und zurückzittern. Nur wenn der Fahrer auf die Bremse tritt, bewegt ein Kolben die Sperrklinke in das Zahnrad und stellt das Auto fest. In diesem Moment gibt es lediglich zwei Möglichkeiten: Hat sich der Wagen relativ zur Ausgangsposition ein kleines Stückchen nach hinten bewegt, trifft die Klinke auf die flache Flanke des Zahns und rutscht wieder in die Anfangslage zurück. Unter dem Strich hat sich also nichts geändert. Sollte der Wagen aber zufällig ein bisschen nach vorne gerollt sein, gerät der Stift mit hoher Wahrscheinlichkeit schon in den nächsten Zwischenraum, da er ja nur die kurze und steile Flanke überspringen musste. Das Fahrzeug wäre dann ein Stück weiter bergauf gelangt.

Bemerkenswert ist, dass das System funktioniert, obwohl der Fahrer in völlig unregelmäßigen Abständen auf die Bremse tritt. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Maschinen müssen die einzelnen Komponenten nicht genau synchron miteinander arbeiten.

Was ist die Antriebsquelle bei dieser Bergfahrt? Die Hagelkörner üben im zeitlichen Mittel keine Nettokraft auf das Auto aus. Auch wenn es bequem erscheinen mag, nur dann und wann mit dem Fuß auf die Bremse zu treten, stammt die Energie für das Vorwärtskommen genau aus dieser Bewegung. Sie zwingt die Sperrklinke den Weg entlang der flachen Zahnflanke in einen der tief liegenden Zwischenräume. Wäre nur eine der Bedingungen nicht gegeben – die Asymmetrie der Ratschenzähne, die Zitterbewegung des Autos durch die Hagelkörner oder die von außen stammende Energie beim Bremsen –, könnte der ganze Mechanismus nicht funktionieren.

Für ein echtes Auto stellt der Hagelkorn-Motor gewiss keinen brauchbaren Antrieb dar. Eine simple Überschlagsrechnung zeigt, dass ein Mensch selbst bei eifrigem Treten des Bremspedals eine Geschwindigkeit von gerade einmal einem Kilometer pro Stunde erreichen könnte – etwa eine Zehntel Wagenlänge in der Sekunde. Dabei würde der Fahrer bestenfalls eine Kraft auf das Gefährt übertragen, die einem Millionstel der Erdanziehung entspricht. Ein Hügel müsste also schon ziemlich flach sein, damit er auf diese Weise überwunden werden könnte.

Aber das Auto im Hagelsturm diente ja nur als Modell für Teilchen von Molekülgröße. Bei einem in Wasser gelösten kleinen Protein ist das Verhältnis der Massen recht ähnlich wie bei Auto und Hagel. Der Unterschied besteht vor allem darin, dass die Wassermoleküle den Eiweißklumpen viele Milliarden Mal in der Sekunde stoßen. Sein zufälliges Zittern – die Brown'sche Molekularbewegung – könnte mit einer winzigen Ratsche in eine Richtung geleitet werden. Ein kleines Protein würde so pro Sekunde bis zu einem Mikrometer (tausendstel Millimeter) – mehr als seine zehnfache Länge – zurücklegen und damit so viel wie ein Auto, das hundert Kilometer in der Stunde fährt. Der Mechanismus würde eine Kraft von bis zu zehn Pikonewton (billionstel Newton) aufbringen, immerhin tausendmal so viel wie die auf ein Molekül ausgeübte Schwerkraft.

Dass dieser Mechanismus wirklich funktioniert, haben Wissenschaftler bereits vielfach demonstriert. Es ist schon erstaunlich, wie zwei kombinierte Zufallsprozesse einen gerichteten Effekt hervorbringen können. Der Physiker

Steckbrief

➤ Ein **molekularer Motor** ist keineswegs nur die Miniaturausgabe einer gewöhnlichen Antriebsmaschine: Während in üblichen Motoren durch Energiezufuhr Bewegung erzeugt wird, verhindert in molekularen Motoren die zugeführte Energie bestimmte Bewegungen. Dies geschieht durch einen Mechanismus nach Art einer Sperrklinke oder Ratsche.

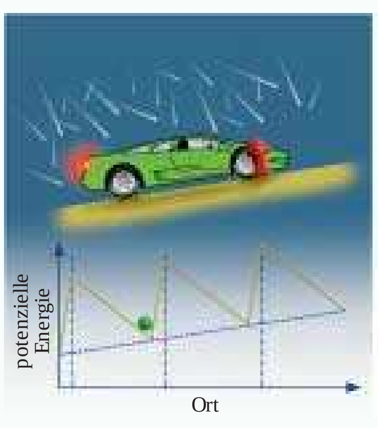
➤ Indem die **Ratsche** unerwünschte Bewegungen unterdrückt und erwünschte zulässt, lenkt der Motor die Zufallsbewegungen der Umgebung in geordnete Bahnen.

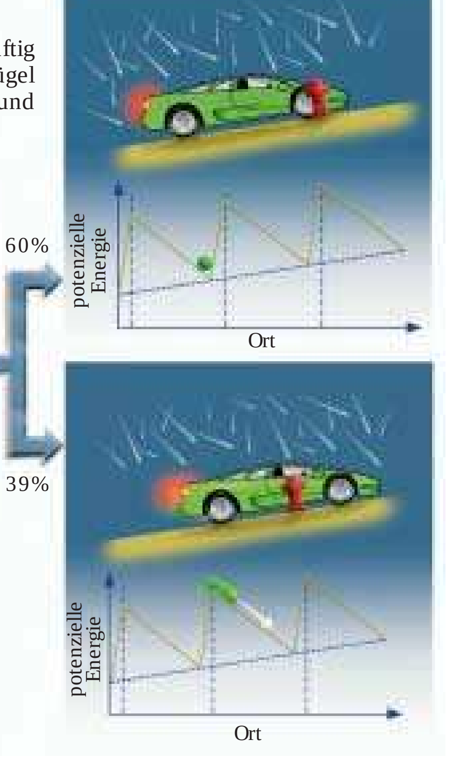
➤ Dieses Prinzip schafft **Ordnung aus Chaos**. Es erklärt nicht nur, auf welche Weise wichtige Prozesse in der lebenden Zelle ablaufen, sondern verspricht auch die Konstruktion künstlicher molekularer Maschinen für vielfältige Anwendungen.

Aufwärts durch Hagelschlag

Sägezahnbremse als Antrieb

Wenn ein Auto mit einer speziellen Ratschenbremse ausgestattet ist und kräftig von Hagelschloßen bombardiert wird, vermag es ohne Motor einen Hügel hinaufzufahren. Im Energiediagramm wird aus dem Hügel eine schräge Gerade und aus der Bremswirkung eine Sägezahnkurve.





Wird die Bremse betätigt (links), so gerät das Auto zwangsweise in eine Kerbe zwischen zwei Zähnen der Energiekurve. Dass ein Hagelkorn das Auto aus dieser fixen Position zu stoßen vermag, ist extrem unwahrscheinlich.

Wenn die Bremse kurz gelöst wird (Mitte), stoßen die Hagelkörner das Auto zufällig vor und zurück. Wegen der Schwerkraft würde es zwar mit der Zeit allmählich nach unten rollen, aber zunächst ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass es den näheren Ort der rechten Zahnspitze passiert als den der linken Spitze (gestrichelte Linien).

Wird die Bremse erneut betätigt (rechts), so landet in diesem Beispiel das Auto mit 60 Prozent Wahrscheinlichkeit wieder am Ausgangspunkt – aber mit 39 Prozent drückt die Bremswirkung den Wagen einen Zahn weiter. (In nur einem Prozent aller Fälle rollt das Auto um einen Zahn rückwärts.)

PHILIP HOWE

Juan M. R. Parrondo von der Universidad Complutense in Madrid hat die Gültigkeit dieses Prinzips für Glücksspiele nachgewiesen. Indem der Kandidat zwischen zwei Spielen wechselt, die ihm jedes für sich genommen schlechte Chancen lassen, vermag er das Schicksal zu seinen Gunsten zu wenden.

Solche Beispiele werden bei Physikern sofort den Verdacht aufkommen lassen, die Ratsche verletze den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der ausdrücklich verbietet, mechanische Arbeit aus thermischen Zufallsbewegungen zu gewinnen. In seinen berühmten „Lectures on Physics" hat Richard Feynman eine Sperrklinke analysiert, die mit einer Art Flügelrad verbunden ist (Abbildung Seite 41). Könnten die asymmetrischen Zähne verhindern, dass dieses Rädchen sich rückwärts dreht, so würden die molekularen Zusammenstöße tatsächlich eine unregelmäßige, aber unaufhörliche Vorwärtsdrehung hervorrufen. Das ergäbe ein so genanntes Perpetuum mobile der zweiten Art, das nach dem Zweiten Hauptsatz verboten ist. (Da der Mechanismus keine Energie aus dem Nichts zaubert, verletzt er hingegen nicht den Ersten Hauptsatz, der die Erhaltung der Energie postuliert.)

Wie Feynman zeigte, vermag dieses System nicht ohne Energiezufuhr von außen zu funktionieren. Eine Feder muss die Sperrklinke niederdrücken, und diese Feder vollführt selbst thermische Bewegungen. Dadurch zieht sie sich zufällig immer wieder zusammen, hebt den Haken hoch und gibt vorübergehend das Zahnrad frei. Wegen der Asymmetrie der Zähnchen springt die Ratsche dabei höchstwahrscheinlich um einen Zwischenraum zurück.

Doch kein Perpetuum mobile der zweiten Art

Wenn Flügelrad und Federmechanismus die gleiche Temperatur haben, heben sich die Vorwärtsbewegungen durch molekulare Stöße und die Rückwärtsschritte durch die unzuverlässige Feder exakt auf. Darum rotiert eine Ratsche im thermischen Gleichgewicht nicht von selbst.

Doch das gilt nicht, wenn das System an verschiedenen Stellen unterschiedlich warm ist. Hat das Flügelrad eine höhere Temperatur als die Feder, so dreht sich die Ratsche in der Richtung, die man intuitiv erwarten würde. Ist hingegen die Feder wärmer, so rotiert das ganze Gebilde in der Gegenrichtung – als wollte es der Sperrklinke einen Streich spielen. Jede Abweichung vom Gleichgewichtszustand ermöglicht eine gerichtete Nettobewegung. Dabei muss von außen nicht unbedingt Wärme zugeführt werden. Im Beispiel des Autos war es mechanische Energie durch Treten der Bremse. Diese Energie verwandelte sich in Wärme, als das Fahrzeug kurz zum Stehen gebracht wurde. Auf diese Weise gehorchen all diese Systeme dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

Im molekularen Maßstab sind große Temperaturunterschiede zwar selten, doch dafür treten andere Arten von Ungleichgewicht auf. Vor einigen Jahren führte der organische Chemiker T. Ross Kelly am Boston College dazu ein raffiniertes Experiment durch. Sein Team synthetisierte eine Feynman-Ratsche aus Triptycen, einem Y-förmigen Molekül, das als Flügelrad diente, und dem G-för- ▶

migen Molekül Helicen als Sperrklinke mit Feder. Da Helicen einen Knick aufweist, lässt sich das Flügelrad leichter im Uhrzeigersinn drehen als andersherum. Trotz dieser Asymmetrie zeigten Beobachtungen mittels Kernspinresonanz-Spektroskopie, dass Rotationen exakt gleich häufig in beide Richtungen auftraten – wie Feynman vorhergesagt hatte.

Kelly störte nun das Gleichgewicht, indem er zusätzlich einen chemischen Prozess ins Spiel brachte: die Hydrolyse von Phosgen-Gas, das heißt dessen Spaltung durch Wasser. An einen Flügel des Triptycen-Flügelrads setzten die Wissenschaftler eine Aminogruppe, und an die Helicen-Sperrklinke eine Hydroxyalkyl-Gruppe.

Jedes Mal, wenn der Flügel der Sperrklinke nahe kam, reagierten diese chemischen Substanzen – vom Phosgen angetrieben – miteinander und verhinderten jede weitere Bewegung gegen den Uhrzeigersinn. Insgesamt drehten sich deshalb die meisten Flügelrädchen im Uhrzeigersinn. Dieses System ist zwar noch kein echter molekularer Motor, denn es würde zu seinem Ausgangspunkt zurückstreben, wenn die Bremse gelockert und erneut angezogen würde; aber es demonstriert immerhin das Prinzip.

Ionenpumpen als Ratschen

Es gibt auch Arbeitsgruppen, die mit anderen Sperrklinken eine kontinuierliche Rotation erzielt haben. Ein Team um Ben L. Feringa von der Universität Groningen (Niederlande) treibt zum Beispiel einen molekularen Motor mit Licht an.

Neue Experimente haben gezeigt, dass zumindest einige biologische Maschinen nach dem Ratschenprinzip arbeiten – zum Beispiel Ionenpumpen. Diese Proteine transportieren elektrisch geladene Teilchen entgegen der normalen Flussrichtung durch Zellmembranen. Könnten die Ionen frei diffundieren, würden sie im zeitlichen Mittel einer Kombination aus Konzentrationsgefälle und elektrischem Feld folgen, dem Gradienten im so genannten elektrochemischen Potenzial. Die Pumpen bewegen die Teilchen mit Hilfe einer äußeren Energiequelle „bergauf“ und sorgen dafür, dass die lebenswichtigen Ungleichgewichte in der Stoffverteilung erhalten bleiben.

Das System gleicht auf den ersten Blick einem Tunnel durch die Membran. Im Prinzip können Ionen an beiden Eingängen hinein- und hinauswandern. Aber die Enden unterscheiden sich hinsichtlich der Öffnungsgröße und der Stärke der Wechselwirkungen zwischen Protein und Ionen. Vereinfacht gesagt steht das

Modell-Motor mit Strahlungsantrieb

Licht als Straße und Bremse

Ein Bremsstrahl treibt ein Plastikkügelchen vor sich her

Vor mehreren Jahren verwirklichte der Physiker J. Albert Libchaber an der Princeton University einen molekularen Motor nach dem Prinzip des „Autos mit Bremsantrieb“. Dem Auto entsprach ein durchsichtiges Plastikkügelchen mit einigen tausendstel Millimetern Durchmesser, das in einem Becherglas mit Wasser schwebte und gleichsam auf einer Straße aus Licht geführt wurde: Der schwache Strahlungsdruck der im Kügelchen gebrochenen und dahinter fokussierten Lichtstrahlen stieß es immer in Richtung der größten Strahlungsintensität. Ein Lichtstrahl gab den kreisförmigen Verlauf des Parcours vor. Ein zweiter Lichtstrahl fungierte als Bremse. Er sorgte für ein abwechselndes Muster hellerer und dunklerer Regionen auf der Strecke, wobei die Entfernungen zwischen Maxima und Minima richtungsabhängig waren: Von einem Punkt maximaler Helligkeit war es im Uhrzeigersinn nur ein kurzes Stück bis zum nächsten Minimum, in entgegengesetzter Richtung jedoch viel weiter. Diese Asymmetrie entspricht den Sägezähnen einer mechanischen Ratsche.

Plastikkügelchen

PHILIP HOWE

Wurde die Lichtbremse betätigt, so wanderte das Kügelchen zum nächsten Maximum und blieb dort, solange die Bremse aktiv war. Sobald der Bremsstrahl ausgeschaltet wurde, taumelte das Kügelchen zufällig auf der Kreisbahn umher. Wenn es dabei den Ort eines Minimums passierte – im Uhrzeigersinn ein kurzes Stück, entgegengesetzt eine längere Strecke –, drückte der nächste Bremsvorgang es zum nächsten Maximum. Auf Grund der Asymmetrie wanderte das Kügelchen eher im Uhrzeigersinn. Sein Tempo hing davon ab, wie oft die Wissenschaftler den Bremsstrahl ein- und ausschalteten: Je schneller sie das taten, desto flinker kreiste die Kugel – allerdings nur so lange, bis die Geschwindigkeit des „Autos“ sich der Größenordnung der Brown'schen Molekularbewegung näherte.

Dieses System funktioniert ohne intelligente Steuerung von außen. Selbst wenn der Bremsstrahl ganz zufällig an- und ausgeschaltet wird, drehte die Kugel ihre Kreise.

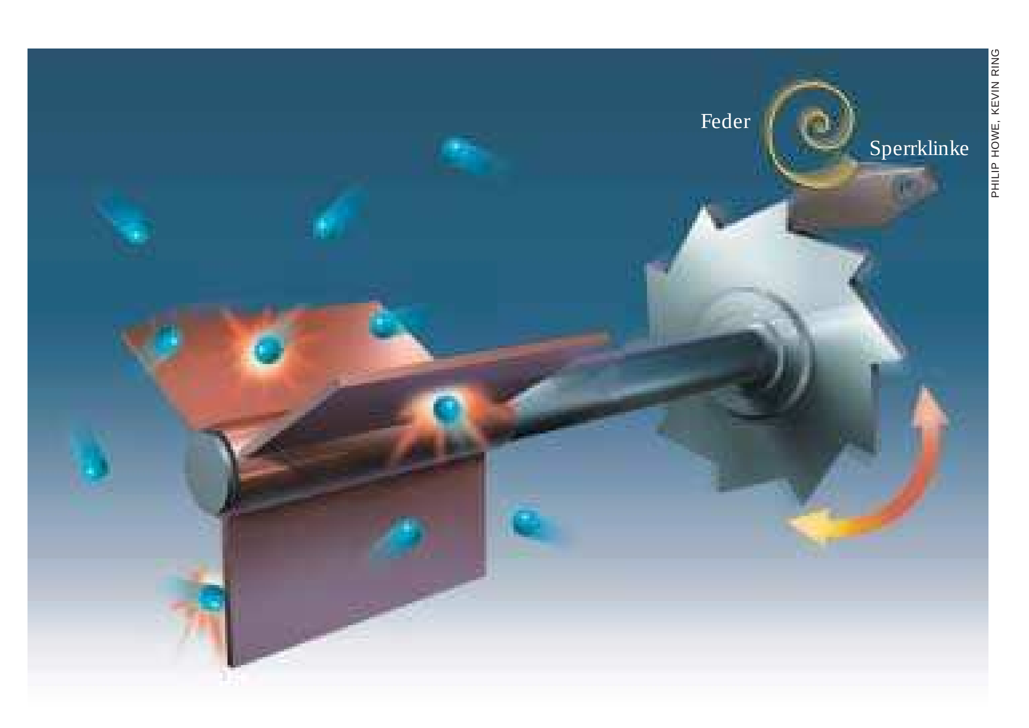


Tor beispielsweise zum Zellinneren weit offen, und elektrische Kräfte ziehen die geladenen Teilchen an und halten sie. Die Außenseite wirkt dagegen wenig einladend und bindet nur selten Ionen, die schnell wieder wegdiffundieren. Das Bild ändert sich, wenn an einer anderen Stelle der Ionenpumpe ein Molekül Adenosintriphosphat (ATP) gespalten wird. Der Tunnel verändert dadurch seine Form und geht in einen zweiten Zustand über, in dem der innere Eingang des Tunnels geschlossen ist. Gleichzeitig wandern die schon aufgenommenen Ionen nach außen und verlassen dort die Ionenpumpe. Der Kreislauf ist vollständig, wenn neues ATP die Spaltprodukte ersetzt. Die Pumpe klappt wieder in den nach innen offenen Zustand zurück und sammelt neue Teilchen für den nächsten Transport.

Sowohl die Formänderungen des Proteins als auch der Zerfall des ATPs laufen zufallsgesteuert ab. Bei der chemischen Spaltung des ATPs handelt es sich um eine Reaktion, die weit vom Gleichgewicht entfernt stattfindet. Daher setzt sie viel Energie frei, die – wie das Treten der Bremse im Automodell – das Gesamtsystem in einen Zustand zwingt und so die Ionen gegen das Potenzialgefälle antreibt. Eine Synchronisation der beiden Prozesse ist nicht erforderlich. Dieses Ratschenmodell haben Tian Y. Tsong, damals an der Johns Hopkins University, und ich Mitte der achtziger Jahre entwickelt. Wir legten ein elektrisches Wechselfeld an eine Ionenpumpe an und beobachteten, wie sie – sogar ohne ATP – Ionen gegen den elektrochemischen Potenzialgradienten transportierte.

Je nach den aktuellen Bedingungen können unterschiedliche Teilvorgänge sozusagen die Bremse betätigen. Das Enzym ATP-Synthase kann einerseits wie eine Ionenpumpe ATP zerlegen und damit Protonen über eine Membran pumpen. Seine eigentliche Aufgabe liegt jedoch darin, die Teilchen dem Potenzialgefälle folgen zu lassen und ihre Energie zu nutzen, um ATP zu produzieren. Nach dem Wechselbindungsmodell, für das Paul D. Boyer, damals an der University of California in Los Angeles, 1997 den Nobelpreis für Chemie erhielt, verläuft dieser Zyklus über drei Stufen, in denen von den drei aktiven Zentren des Enzyms jeweils eines leer ist, eines die Vorstufen von ATP enthält und eines das fertige Molekül birgt (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 18).

Im Jahre 1996 wiesen Dirk Sabbert, Siegfried Engelbrecht und Wolfgang Junge von der Universität Osnabrück nach, dass sich dazwischen eine Art molekulare Pleuelstange dreht. Angetrieben vom Protonenfluss drückt sie die Zentren der Reihe nach von einem Zustand in den nächsten. Agiert das Enzym als Ionenpumpe, ist die Reihenfolge umgekehrt: Wie bei einem Wankelmotor versetzen die drei Zentren die Pleuelstange in Rotation. Diese gibt die Bewegung weiter an den Proteinabschnitt in der Membran, der schließlich die Protonen „bergauf“ transportiert (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 20).



Richard Feynman zeigte an einer Ratsche im Wärmebad, unter welchen Bedingungen ein zufälliges Bombardement eine gerichtete Bewegung hervorrufen kann. Die mit dem Flügelrad kollidierenden Gasmoleküle drehen das Zahnrad – aber in welche Richtung? Sofern Sperrklinke und Feder korrekt funktionieren, kann das Zahnrad nur gegen den Uhrzeigersinn rotieren. Doch wenn die Feder auf Grund der thermischen Unruhe der Umgebung zufällig auf und zu schnappt, fördert die Asymmetrie der Zähne eher eine Drehung im Uhrzeigersinn. Falls die Feder stärker erwärmt wird als das Gas – und der Mechanismus sich nicht im thermischen Gleichgewicht befindet –, dominiert dieser Effekt.

Brown’scher Protein-Transport in Mikrotubuli?

Das Brown’sche Modell für molekulare Motoren fordert in manchen Fällen altbewährte Theorien heraus. Das Protein Kinesin besteht aus zwei locker miteinander verbundenen Domänen. Es transportiert andere Eiweißstoffe entlang dünner, Mikrotubuli genannter Proteinketten, die sich durch das Zellinnere ziehen. Trägt man in einem Diagramm auf, wie viel Energie frei wird oder eingesetzt werden muss, wenn das Kinesin an die verschiedenen Bereiche der Mikrotubuli bindet, entsteht eine Sägezahnkurve. Zwischen den bevorzugten Kontaktstellen gibt es Barrieren mit unterschiedlich steilen Flanken, die ein Weiterrutschen des Kinesins verhindern. Im Brown’schen Modell wandelt die Spaltung von ATP das Energiediagramm in eine flache Kurve um. Dadurch reichen die zufälligen Kollisionen kleiner Moleküle wie Wasser mit dem Kinesin aus, um das Protein vor- oder zurückzittern zu lassen. Wenn die Abbauprodukte des ATPs wegdiffundieren, nimmt das System wieder den vorherigen Zustand mit dem Sägezahnpotenzial ein. Auf Grund der Asymmetrie ist dies in den meisten Fällen mit einer Nettowanderung in die gewünschte Richtung verbunden.

Die traditionelle Vorstellung erklärt den Vorgang ganz anders. Sie schreibt der Form des Kinesins eine zentrale Rolle zu. Wie eine Raupe auf einem Zweig soll das Molekül seine vordere Domäne ausstrecken, einen neuen Haltepunkt am Mikrotubulus finden und sich dort anklammern, woraufhin der hintere Teil nachrückt. Nach diesem Modell sind also unbedingt beide Hälften des Kinesins erforderlich: Fehlt ein Teil, kann das Molekül nicht mehr die Mikrotubuli entlangwandern. 1998 führten Yasushi Oka- ▶

Muskelkontraktion als Brown'sche Ratsche

Kraft des Zufalls

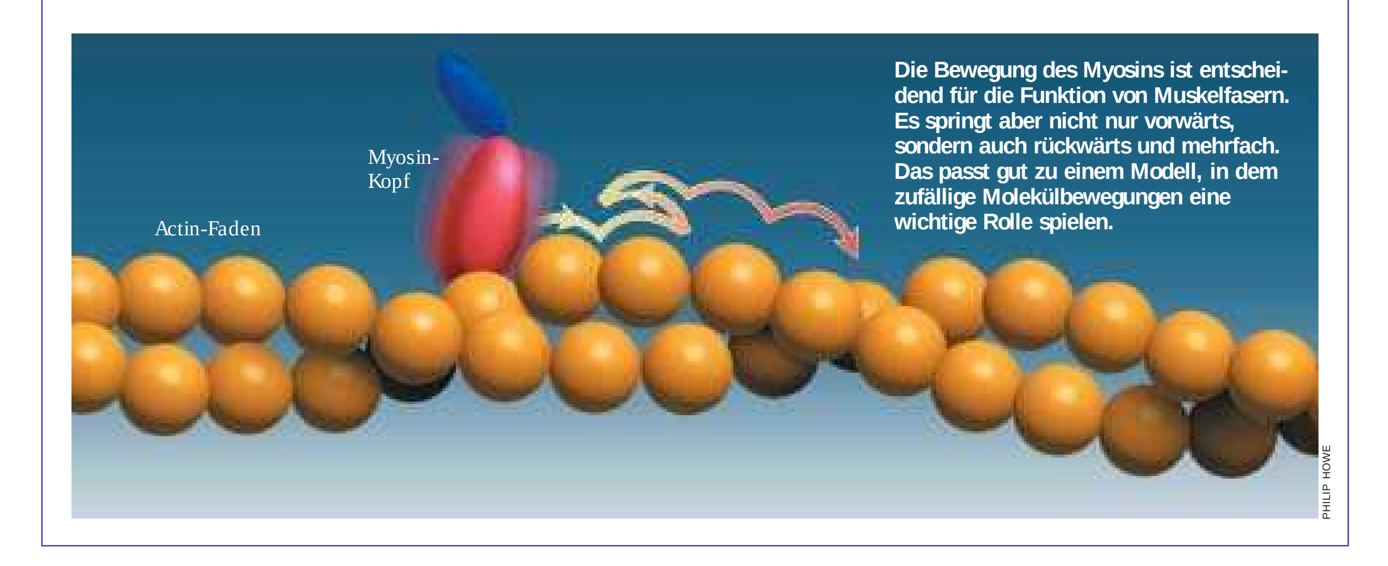
Warum arbeiten Muskeln effizienter als jede Maschine?

Überraschenderweise liefert das Modell der Brown'schen Ratsche auch eine neue Erklärung für die Muskelkontraktion. Schon lange ist bekannt, dass dabei zwei Proteinfäden namens Myosin und Actin aneinander entlang gleiten. Die Moleküle wandeln chemische Energie in mechanische Arbeit um, und zwar mit einem Wirkungsgrad von rund fünfzig Prozent. Das funktioniert selbst dann, wenn die chemische Energie nur wenig größer ist als das thermische Rauschen der Umgebung. Hingegen arbeiten künstliche Maschinen wie Elektro- und Automotoren bei Energien weit oberhalb der Umgebungswärme. Wie kann der Muskel so viel effizienter arbeiten?

Nach der klassischen Theorie kontrahiert der Muskel, wenn das Myosin ein ATP-Molekül (Adenosintriphosphat) spaltet und mit der frei werdenden Energie seine Form ändert. Dabei zieht es Actinfäden schrittweise weiter – als ginge es Sprosse für Sprosse eine Leiter hinauf. Dieses Modell erfreut sich großer Beliebtheit, da es die Muskelkontraktion als einen mechanischen, deterministischen Vorgang erklärt. Das Problem ist freilich, dass der Wirkungsgrad eines gewöhnlichen Motors immer schlechter wird, je mehr der Mechanismus schrumpft.

In einer Reihe von Experimenten mit neuen Methoden, die kleinste Bewegungen und Kräfte nachweisen können, stellten wir fest, dass Myosin und Actin sich in der Tat nicht deterministisch verhalten. Das Myosin vollführt 5,5 bis 27,5 Nanometer weite Zufallssprünge. Jeder Schritt ist ein ganzzahliges Vielfaches von 5,5 Nanometern, was dem Abstand der Actinmoleküle in einem Proteinfaden entspricht. Jeder Sprung – egal, wie groß er ist – kostet das Myosin nur ein einziges ATP-Molekül. Mitunter hüpft es sogar zurück statt nach vorne. Das passt sehr gut zum Brown'schen Ratschenmodell, lässt sich aber mit der klassischen Theorie kaum erklären. Zwar sind noch viele Fragen offen – zum Beispiel weiß niemand, wie das ATP die Brown'sche Bewegung in eine Richtung lenkt –, doch immerhin erklärt das neue Modell den hohen Wirkungsgrad der Muskelkontraktion: Sie kämpft nicht gegen das Rauschen an, sondern spannt es vor den eigenen Karren.

*Der Biophysiker **Toshio Yanagida** ist Professor an der Medizinischen Fakultät der Universität Osaka (Japan).*



Die Bewegung des Myosins ist entscheidend für die Funktion von Muskelfasern. Es springt aber nicht nur vorwärts, sondern auch rückwärts und mehrfach. Das passt gut zu einem Modell, in dem zufällige Molekülbewegungen eine wichtige Rolle spielen.

da und Nobutaka Hirokawa von der Universität Tokio ein entsprechendes Experiment durch. Sie ersetzten eine der Domänen durch eine Reihe elektrisch geladener Aminosäuren, sodass die Form des Moleküls anders war, aber die energetischen Eigenschaften im Wesentlichen erhalten blieben. Tatsächlich konnte das veränderte Molekül etwa genauso schnell die Mikrotubuli entlangklettern wie normales Kinesin mit zwei Domänen – eine elegante Bestätigung des Brown'schen Modells.

Es ist gut möglich, dass Zufallsbewegungen an noch viel mehr biologischen Prozessen beteiligt sind, darunter Muskelkontraktion (Kasten oben), Proteinsynthese, Trennen und Zusammenfügen von DNA-Strängen, Transport von Proteinen durch Zellmembranen und Abbau nutzlos gewordener Eiweiße.

In einigen Fällen halten sich experimentelle Hinweise für und gegen Brown'sche Mechanismen einstweilen noch die Waage. Doch eines ist sicher: Jede molekulare Maschine muss entweder gegen die Brown'sche Bewegung ankämpfen oder sie sich zu Nutze machen – und die letztgenannte Option bietet anscheinend mehr Vorteile.

Mittlerweile erforschen Wissenschaftler nicht nur natürliche Sperrklinken, sondern nutzen selbst dieses Prinzip. Sie sortieren damit beispielsweise Moleküle nach ihrer Größe. Kleinere Teilchen wandern im Trommelfeuer des Lösungsmittels schneller als schwerere Substanzen. Die ersten Brown'schen Siebe konstruierten vor einem Jahrzehnt die französischen Physiker Armand Ajdari und Jacques Prost. Joel S. Bader und seine Kollegen vom Biotechnologie-Unternehmen Curagen in New Haven (Connecticut) haben einen Apparat zum Sortieren von DNA-Molekülen konstruiert. Ihr Ansatz verspricht neue Sortiertechniken, die genauer und selektiver sind als die derzeit üblichen Elektrophorese-, Zentrifugen- und Destillationsverfahren.

1996 schlugen Martin Bier und ich – damals beide an der University of Chica-

go – vor, an die DNA-Gemische ein elektrisches Feld mit drei verschiedenen Zuständen anzulegen: positiv, negativ oder ausgeschaltet. Anders als bei den sonst üblichen Feldern, die nur „ein" oder „aus" waren, sollten darin leichte Teilchen in die eine und schwere Moleküle in die entgegengesetzte Richtung wandern. Theoretiker an verschiedenen Universitäten haben seitdem die Idee auf zwei Dimensionen erweitert.

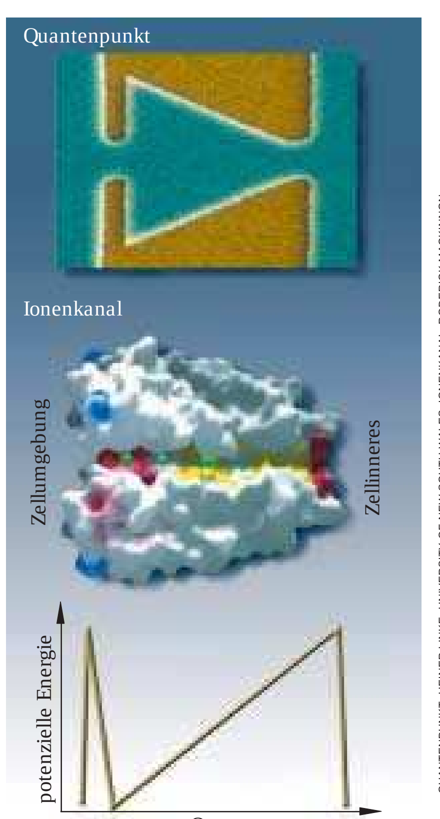
Vor zwei Jahren bauten dann Alexander van Oudenaarden und Steven G. Boxer an der Stanford University ein funktionstüchtiges zweidimensionales Sieb. Mittels Elektronenstrahl-Lithografie trugen sie auf einen Objektträger ein Muster asymmetrischer, 25 Nanometer hoher Barrieren auf. Hinein füllten sie eine Flüssigkeit mit elektrisch neutralen Lipidmolekülen, mischten einige Lipide mit unterschiedlichen elektrischen Ladungen dazu und legten ein elektrisches Feld an. Weil die einfach geladenen Moleküle langsamer wanderten als die doppelt geladenen, hatten sie in den Mulden mehr Zeit, sich seitwärts auszubreiten. Die Asymmetrie der Barrieren machte es ihnen einfacher, in eine Richtung zu driften, statt sich einfach nur auszubreiten. Am anderen Ende des Objektträgers angekommen, hatten die Lipide sich schließlich selbst je nach ihrer Ladung in verschiedene Gruppen sortiert.

Unterdessen hat die Ratsche sogar Einzug in die Welt der Quanten gehalten. Vor fünf Jahren hatte Peter Hänggi von der Universität Augsburg die faszinierende Idee, dass Quanteneffekte – interferierende Wellenfunktionen, diskrete Energiewerte und tunnelnde Elektronen – einen weiteren Zufallsgenerator darstellen könnten. Bei extrem niedrigen Temperaturen sollten sie auf kleinstem Raum die Rolle der Brown'schen Bewegung übernehmen. Mit einer Quantenratsche könnten Wissenschaftler einzelne Elektronen präzise beeinflussen, ohne elektrische Felder ähnlich genau steuern zu müssen

Seither haben Charles M. Marcus und seine Mitarbeiter an der Stanford University aus einem Quantenpunkt eine Elektronenpumpe fabriziert, die als Tunnel zwischen zwei großen Elektronenreservoirs wirkt und mit elektrostatischen Barrieren verschlossen werden kann. Indem die Forscher die Spannung zwischen dem Quantenpunkt und den Barrieren zyklisch variierten, verschoben sie einzelne Elektronen zwischen den Reservoirs. Weil das System stets nahe dem Gleichgewicht blieb, war der Prozess reversibel und somit der Energieaufwand nahezu beliebig klein. Einen ähnlichen Mechanismus haben Imre Derényi und ich kürzlich an der Universität Chicago konstruiert; wir verwendeten abrupte und zufällige Spannungsänderungen. Ein solches System ist prinzipiell irreversibel und darum energieaufwendiger. Doch hat es den Vorteil, als Modell für irreversible chemische Reaktionen dienen zu können – etwa für diejenigen, welche die Ionenpumpe antreiben. Auch ließe es sich als Elektronenpumpe in molekularen Computern nutzen oder zur Signalverstärkung in extrem dünnen Drähten.

Heiner Linke hat an der Universität Lund (Schweden) dreieckige Quantenpunkte als Sperrklinken eingesetzt: Für die Elektronen war es schwieriger, die Spitze des Dreiecks zu passieren als die Basis. Bei Anlegen einer Wechselspannung floss deshalb ein Strom, obwohl die Spannung im zeitlichen Mittel gleich null war. Die Richtung des Stroms ließ sich durch Variieren der Temperatur steuern. Bei hohen Temperaturen wirkte das Bauteil als thermische Ratsche: Die Elektronen strömten vorzugsweise aus der Spitze der Dreiecke, weil es ihnen nach deren Passieren schwer fiel, wieder umzukehren. Bei tiefen Temperaturen verwandelte sich das Dreieck in eine Quantenratsche: Die Elektronen strömten mit Vorliebe aus der Basis, weil die Energiebarriere dort weniger hoch war und sie leichter durchtunneln konnten. Solche Bauteile könnten die Wirbelströme in Supraleitern dämpfen und damit ein großes Problem für Magnete und supraleitende Spulen lösen.

Auf diese Weise inspiriert das Prinzip der Brown'schen Sperrklinke nicht nur die Erforschung biochemischer Prozesse, sondern in zunehmendem Maße auch die Entwicklung miniaturisierter technischer Geräte. Auch in Zukunft wird dabei der Zufall ein Wörtchen mitzureden haben – aber nicht als Störfaktor, sondern als Ordnungsprinzip. Wie heißt es doch so schön? Wenn du einen Feind nicht besiegen kannst, dann verbünde dich mit ihm. ■



Natürliche und künstliche Ratschen funktionieren nach demselben Prinzip. Der dreieckige Quantenpunkt auf einem Silizium-Wafer wirkt als Diode: Er verwandelt Wechselstrom in Gleichstrom. Der Ionenkanal, hier im Längsschnitt, ist ein hundertmal kleineres Protein, das wie eine biologische Diode wirkt. Das Energiediagramm sieht für beide Systeme praktisch gleich aus.

Literaturhinweise

Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall. Von Manfred Eigen und Ruthild Winkler. Piper, München 1975.

Playing Both Sides. Von Erica Klarreich in: The Sciences, Bd. 41, S. 25 (2001).

A Single Myosin Head Moves along an Actin Filament with Regular Steps of 5.3 Nanometres. Von K. Kitamura et al. in: Nature, Bd. 397, S. 129 (1999).

Thermodynamics and Kinetics of a Brownian Motor. Von R. Dean Astumian in: Science, Bd. 276, S. 917 (1997).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*

R. Dean Astumian *ist seit kurzem Physikprofessor an der University of Maine; zuvor lehrte er Biophysik an der Universität Chicago. Er hat zahlreiche Artikel über molekulare Motoren und Pumpen publiziert. Im Jahre 1987 wurde er mit dem Galvani-Preis der Bioelectrochemical Society ausgezeichnet.*

GEWEBEZÜCHTUNG

Hilfsarbeiter für die Leber

Bioreaktoren mit speziellen Mikromodulen sollen einmal beim Ausfall der Leber vorübergehend die vielfältigen Funktionen dieses zentralen Stoffwechselorgans übernehmen. Der am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Prototyp enthält zwar erst 250 Millionen Leberzellen, aber das in einem Volumen von nur drei Kubikzentimetern.



THOMAS BRAUN

Von Eric Gottwald

Akutes Leberversagen ist eine der gefährlichsten Situationen für den Organismus. Daran sterben allein in den USA jährlich 2000 bis 3000 Patienten, in Deutschland um die 300. Immerhin etwa zehn Prozent der Krankheitsfälle wären jedoch reversibel – theoretisch: Ist das dramatische Geschehen zum Beispiel durch eine Virusinfektion oder durch die Überdosierung von Medikamenten verursacht, könnte sich das Organ erholen, wenn es zeitweilig entlastet würde.

Dafür geeignete Systeme sind allerdings sehr viel schwieriger zu entwickeln als Dialysegeräte, wie sie seit langem zur Blutwäsche dienen, wenn die Nieren zu versagen beginnen. Eine rein technische Apparatur könnte nie sämtliche Funktionen der Leber übernehmen, allenfalls einige entgiftende kurzfristig unterstützen. Als zentrales Stoffwechselorgan erfüllt die größte Drüse unseres Körpers vielfältige Aufgaben:

➤ Sie verwertet aufgenommene Nahrungsstoffe,
➤ produziert Cholesterin, Gallenflüssigkeit sowie Proteine des Blutplasmas wie Albumine und Blutgerinnungsfaktoren,
➤ speichert Eiweiße, Fette, Vitamine und das von ihr gebildete Kohlenhydrat Glykogen,
➤ wirkt entgiftend, indem sie das aus dem Eiweißstoffwechsel und von Darmbakterien stammende Ammoniak vor allem in Harnstoff umsetzt,
➤ macht aus dem Verdauungstrakt aufgenommene Fremdsubstanzen unschädlich,
➤ dient als Blutreservoir.

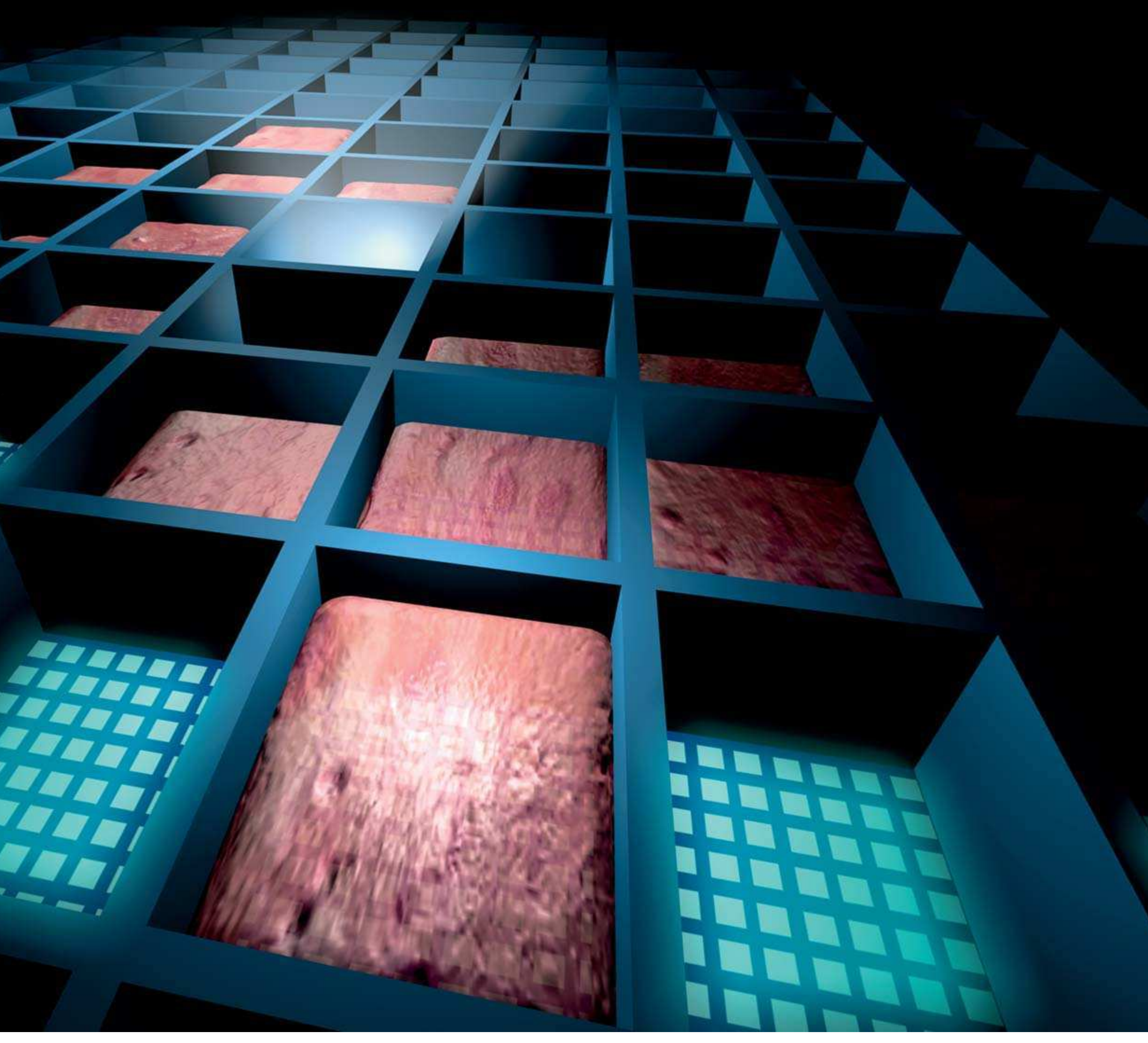
Für diese und weitere Aufgaben nutzt das Organ allein rund 600 Enzyme als Biokatalysatoren. Auch das gibt eine Vorstellung davon, wie steinig der Weg zur künstlichen Leber ist.

Die derzeit einzige wirksame Hilfe, was das langfristige Überleben anbelangt, bietet eine teilweise oder vollständige Transplantation. Da jedoch ein eklatanter Mangel an Spenderorganen besteht, sterben viele Patienten noch während der Wartezeit. Die rechtzeitig operierten Empfänger wiederum sind in ihrer Lebensqualität eingeschränkt, weil ihre Immunabwehr medikamentös abgeschwächt werden muss, damit der Körper das fremde Gewebe nicht abstößt.

Deshalb arbeiten Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure schon geraume Zeit an Apparaturen und Verfahren, die bei mutmaßlich reversiblen Formen des Leberversagens so lange die eingeschränkten Funktionen zumindest unterstützen oder im Idealfall gänzlich übernehmen könnten, bis das geschädigte Organ sich wieder regeneriert hat. Ihr Design soll Abstoßungsreaktionen weit gehend ausschließen.

Die bislang entwickelten Vorrichtungen und Verfahren, die man etwas irreführend alle unter dem Begriff „künstliche“ Leber zusammenfasst, gliedern sich im Wesentlichen in drei Gruppen:

➤ Für biologische Systeme nutzt man ausschließlich die Stoffwechselleistung tierischer oder menschlicher Leberzellen (siehe Kasten auf Seite 47).
➤ Nicht-biologische Systeme greifen entweder pharmazeutisch ein oder funktionieren nach Filterprinzipien (siehe Kasten auf Seite 49).
➤ Hybridsysteme kombinieren technische Filtration mit den Leistungen von lebenden Leberzellen, meist solchen tierischen Ursprungs. Implantierbare Systeme dieser Art befinden sich zwar in der Entwicklung. Ich konzentriere mich im Folgenden jedoch auf solche, die außerhalb des Körpers – extrakorporal – einzusetzen sind; denn sie dürften entschei-

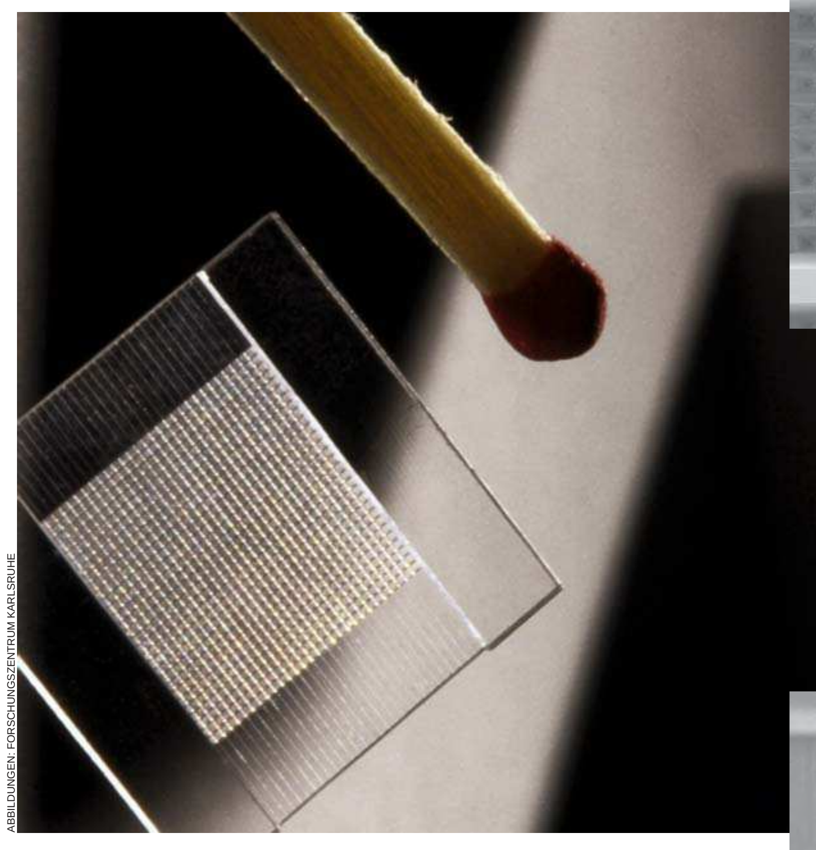


Ein künstlerischer Blick auf einen Zellchip: ein Raster von Mikrocontainern, in denen Zellen beispielsweise für den Ersatz von Leberfunktionen dreidimensional kultiviert werden können. In Wirklichkeit ist der Boden – ähnlich einem Eierkarton – als Gitter pyramidenförmiger Vertiefungen gestaltet.

dend für die Routinebehandlung von akutem Leberversagen werden.

Noch keines dieser Systeme ist derzeit bereits standardmäßig einsetzbar. Allesamt sind sie noch so weit von einem wirklichen künstlichen Organ entfernt wie eine Buschtrommel von einem Handy. Ein Organ ist eben mehr als die Summe seiner Bestandteile, in diesem Falle der verwendeten zellulären und extrazellulären Komponenten. Auch liegen klinische Erfahrungen bislang zumeist nur aus Einzelversuchen vor oder aus Studien an wenigen Patienten. Aber jeder Fortschritt zählt.

Die Idee zu technischen Hybridsystemen für den Menschen, in denen gesunde isolierte Zellen von Säugetieren wenigstens einige der Leberfunktionen übernehmen sollten, kam schon Anfang der sechziger Jahre auf. Die frühen Ansätze waren aber nicht oder nur bedingt erfolgreich. Erst 1987 konnte Kenneth Matsumura vom Immunforschungslabor in Berkeley (Kalifornien) überhaupt den ersten klinischen Einsatz eines Hybridsystems vermelden. Bis dahin waren die Ansprüche an ein ideales, klinisch nutzbares System bereits klar und legten zugleich das Grundkonzept für einen bioartifiziellen Leberersatz fest: Die ausgewählten Leberzellen müssen über längere Zeit vital bleiben und ihre spezifischen Funktionen beibehalten; außerdem sollen sie möglichst auch eingefroren gelagert und sogar notfalls wiederholt verwendet werden können. Im Gerät muss ▶



ABBILDUNGEN: FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Die winzige Rasterplatte aus Kunststoff, „CellChip“ getauft, trägt auf einer Fläche von etwa einem Quadratzentimeter 900 Mikrocontainer (helles Gitter im Rähmchen neben dem Streichholz zum Vergleich).

Die würfelförmigen Abteilungen des „CellChips“ (oben) haben eine Kantenlänge von nur einem drittel Millimeter. Dies entspricht dem mittleren Abstand von zwei Blutkapillaren im Körper.

Die Spitzen der pyramidenförmigen Bodenvertiefungen wurden durch Beschuss mit einem Excimer-Laser perforiert; die etwa zwei Mikrometer feinen Kanäle lassen Nährflüssigkeit zur Versorgung des Gewebes passieren.



ihnen ein wie auch immer geartetes Gerüst Halt bieten, wobei eine möglichst organtypische Umgebung zu gewährleisten ist.

Verantwortlich für die Stoffwechselvorgänge der Leber sind die häufigsten Zellen darin: die so genannten Hepatocyten. Sie lassen sich aus intakten Organen gewinnen und im Labor weiter kultivieren. Dabei kommt es insbesondere darauf an, sie in ihrem ausgereiften, differenzierten Zustand zu erhalten, um ihre organspezifischen Funktionen möglichst lange zu bewahren. Fehlt nämlich Hepatocyten etwa die Möglichkeit, wie in der Leber engen Kontakt untereinander aufzunehmen und dreidimensional zu wachsen, so verlieren sie einige ihrer typischen Funktionen.

Für eine minimale Organfunktion braucht ein extrakorporales System schätzungsweise mindestens zehn Prozent der normalerweise im Körper aktiven Zellmasse. Die Leber eines 75 Kilogramm schweren Menschen wiegt ungefähr 1,5 Kilogramm, was rund 250 Milliarden Zellen entspricht; demnach müssen pro System 25 Milliarden Zellen kultiviert werden. Da aber Spenderorgane als Quelle, wie erwähnt, knapp sind, verwenden Wissenschaftler meist tierische Zellen, häufig solche des Schweins.

Eine interessante ältere Entwicklung stellen die Hohlfaser-Reaktoren dar. Wie schon der Name besagt, bestehen sie aus einer Vielzahl feiner Röhrchen; deren Material ist halbdurchlässig, was den Stoffaustausch gewährleistet. Entweder sind die hohlen Fasern mit Leberzellen gefüllt und werden von dem zu reinigenden Blut oder Plasma umspült; oder die Zellen sitzen zwischen den Fasern, die dann das Blut oder Plasma durchströmt. Mit solchen Reaktoren wurde schon Anfang der siebziger Jahre experimentiert. Bei ihnen ist die Zahl der Zellen im Verhältnis zum durchströmten Volumen relativ hoch. Dies ist dann von Vorteil, wenn entweder das zellfreie Blutplasma oder sogar das volle Blut des Patienten direkt durch das System geleitet wird. Im ersten Fall muss allerdings eine eigene Maschine die Blutflüssigkeit von den Blutkörperchen trennen. Diese Prozedur wird Plasmapherese genannt. Infolge des Flüssigkeitsentzuges dickt aber das Blut im Körper ein, deshalb braucht der Patient so genannte Plasmaexpander-Infusionen als Ersatz.

Jörg Gerlach und seine Mitarbeiter an der Charité in Berlin haben mit Beginn der neunziger Jahre eine Variante dieser Reaktoren entwickelt: Sie ermöglicht es, eine ausreichende Menge Schweine-Hepatocyten in einer Art Kartusche zu kultivieren. Darin versorgen semipermeable Hohlfaserbündel die

Literaturhinweise

Biohybrid-Systeme mit körperfremden Zellen. Von M. J. Lysaght und P. Aebischer in: Der High-Tech-Körper, Spektrum der Wissenschaft, Spezial 4, 1999.

Ein in vitro Gewebemodell in mechanisch gefertigten Mikrostrukturen. Von K.-F. Weibezahn et al. in: Bioforum, Band 17, S. 49, 1994.

A tissue-like culture system using microstructures: influence of extracellular matrix material on cell adhesion and aggregation. Von G.Knedlitschek et al. in: Journal of Biomechanical Engineering, Band 121, S. 35, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft“.*

dazwischen angesiedelten Zellen mit Nährstoffen und Sauerstoff. Das System wurde bereits an einigen Patienten erprobt. Zumindest für 46 Stunden – die bislang längste Testzeit – verspricht es eine ausreichende Leberfunktion. Die Bewertung solcher Systeme ist zwar schwierig, weil Patienten mit akutem Leberversagen auch ohne Behandlung ein bis fünf Tage überleben; doch ist dieser Ansatz zweifellos sehr viel versprechend.

Neben Hohlfaserreaktoren versuchten Forscher noch andere organnahe Kulturen mit effizientem Leber-Stoffwechsel zu verwirklichen. Das Team von Shinichi Kasai vom Medical College in Asahikawa auf Hokkaido erprobte dazu so genannte Mikrocarrier aus Cellulose, das sind im Prinzip watteartige Kügelchen. Je mehr Zellen aber zusammengeballt auf kleinstem Raum wachsen, desto schwieriger wird es, sie gleichmäßig ausreichend zu versorgen. Kompromisse sind unausweichlich. Besser versorgen lassen sich die Zellen, wenn man sie in nur einschichtiger Lage auf größerer Fläche kultiviert. Als Trägermaterial für solche „Monolayer“ dienten 1988 zunächst Platten aus Borosilikatglas, die in jeweils geringem Abstand übereinander gestapelt wurden. Bei diesem System ist jedoch das Verhältnis von Zellzahl zu Volumen ungünstiger. Die Tests damit verliefen auch weniger erfolgreich als erwartet, deshalb wurde dieses Konzept ebenfalls in verschiedener Weise modifiziert.

Bereits im folgenden Jahr versuchte es eine von James Dunn geleitete Gruppe am Massachusetts General Hospital der Harvard-Universität in Boston mit einer Sandwich-Technik: eine Lage Zellen zwischen zwei Gelschichten aus dem Faserprotein Kollagen. In dieser organähnlicheren Umgebung behielten die Zellen länger ihre gewünschte Funktion.

Zellen im Sandwich

Augustinus Bader und seine Mitarbeiter an der Medizinischen Hochschule Hannover verwendeten für ähnliche Sandwiches so genannte Flachmembranreaktoren mit zwei verschiedenen Typen von synthetischen Membranen. Diese versorgen die beidseitig in Kollagen eingebetteten Zellen getrennt mit Sauerstoff und mit Nährstoffen aus dem Kulturmedium. Aus solchen Einheiten lassen sich stapelbare Module herstellen, die jeweils rund 200 Millionen Zellen beherbergen; auf diese Weise können derzeit insgesamt etwa zehn Milliarden Zellen gemeinsam kultiviert werden. Zur Erinnerung: angestrebt werden mindestens 25 Milliarden. Funktionstests über zwanzig Tage zeigten, dass ▶

Biologische Systeme zur Leberentlastung

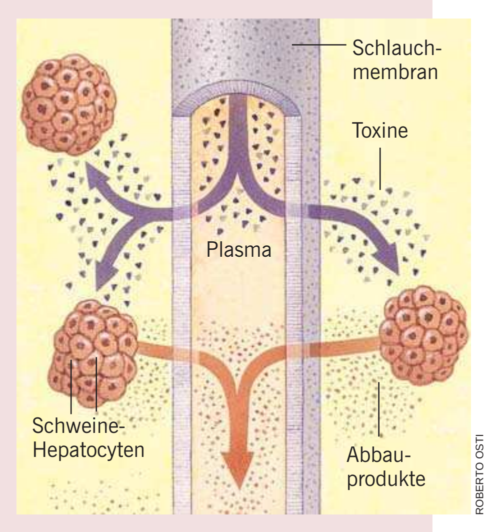
Heroische Rettungsversuche am Menschen

Eine Lebertransplantation – erstmals 1963 durchgeführt – ist noch immer die bestmögliche Therapie bei akutem Leberversagen. Den schweren Eingriff – mittlerweile eine Routineoperation – überleben etwa 60 Prozent der Patienten mindestens fünf Jahre lang. Wegen des Mangels an Spenderlebern wird jedoch intensiv nach alternativen Methoden gesucht.

Schon 1959 hatte Seiji Kimoto von der Universität Tokio ein anderes Verfahren beschrieben, wie eine fremde Leber vorübergehend Funktionen der geschädigten übernehmen könnte: Bei dieser Kreuz-Hämodialyse soll das Blut des Erkrankten ein System mit semipermeabler Membran durchlaufen, auf deren Gegenseite der Kreislauf eines gesunden Organismus angeschlossen ist. Ein 20-jähriger Patient, der auf diese Weise fast eine Stunde lang indirekt mit einem Hund verbunden war, starb sieben Tage später. Desgleichen endeten 1967 zwei Fälle tödlich, obgleich sich Menschen als „Stoffwechsel-Partner“ zur Verfügung gestellt hatten. Eine dritte Patientin jedoch überlebte, nachdem ihr Blut mit einem Durchsatz von insgesamt 190 Litern das Gerät passiert hatte; dies war der erste dokumentierte langfristige Erfolg der Kreuz-Hämodialyse. Sie war jedoch nie sonderlich akzeptiert, weil der Kreislauf des gesunden Partners sehr stark belastet wird; bei einem virusbedingten Leberversagen besteht zudem Infektionsgefahr.

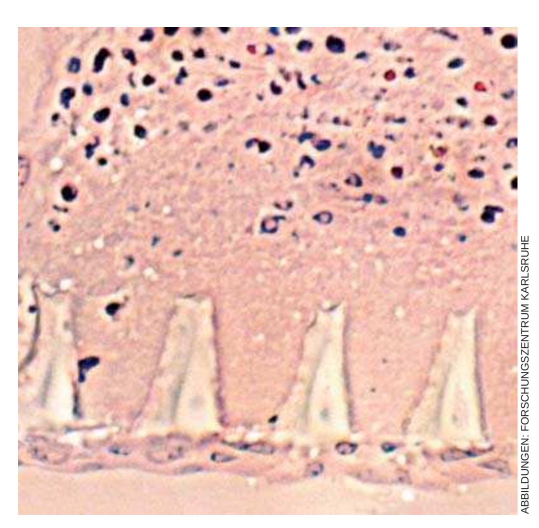
Im Jahr 1965 testete Ben Eiseman an der Kentucky Medical School in Lexington ein weiteres Verfahren: die extrakorporale Leberperfusion. Dabei wird arterielles Blut des Erkrankten direkt durch eine isolierte fremde Leber – die eines Schweins oder eines frisch verstorbenen Menschen – gepumpt und wieder rückgeführt. Alle acht Patienten starben jedoch acht Tage nach der Behandlung. In einem besonders spektakulären Therapieversuch ließ man das Blut eines Patienten mit Leber- und Nierenversagen nacheinander die Lebern von zehn Schweinen, drei Pavianen, einem Kalb, einem Menschenaffen und schließlich die eines Menschen durchlaufen; trotzdem starb er 76 Tage nach der Prozedur. Der Fall legt aber auch nahe, dass Leberversagen das Immunsystem schwächt; denn unter normalen Umständen wären innerhalb kürzester Zeit so viele Antikörper gegen die fremden – überdies zumeist artfremden – Organe gebildet worden, dass die Ärzte nicht einmal mehrere Perfusionen von Schweinelebern hätten durchführen können.

Die extrakorporale Perfusion sollten Systeme vereinfachen, in denen man Scheiben oder Würfel von Lebergewebe beziehungsweise so genannte Sphäroide – Aggregate kultivierter Leberzellen – verwendete, jeweils durch eine technische Membran vom Blut oder Plasma getrennt (unten).



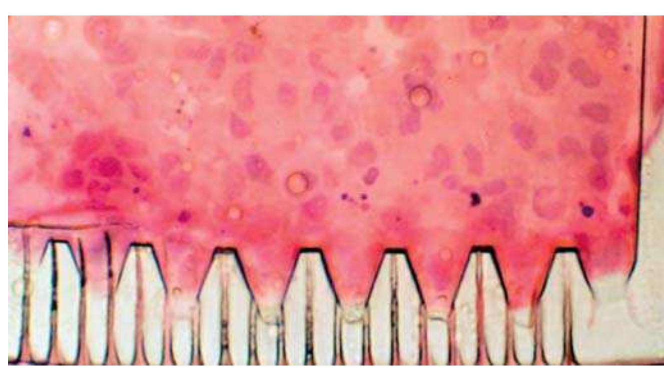
Das zu reinigende Blutplasma durchfließt ein System von Schläuchen in einer Kammer mit gesunden Leberzellen von Schweinen. Giftige Stoffwechselprodukte diffundieren aus dem Plasma in die Zellen, die sie in unschädliche Produkte umwandeln.

Erstaunlicherweise arbeiteten frisch entnommene Zellen nicht besser als vorher eingefrorene. Wie sich herausstellte, waren die meisten aufgetauten Zellen tot; die beobachteten positiven Effekte beruhten also auf der noch verbliebenen Aktivität der Leberenzyme. Umgekehrt hieß das, dass frische Zellen bereits einen wesentlichen Teil ihrer ursprünglichen Aktivität verloren haben, wenn sie nach der Isolierung in Kultur genommen werden. Wie unsere Forschungsarbeiten zeigten, gewinnen die Zellen einen Teil ihrer Leistungskraft zurück, wenn man sie langfristig in 3-D-Kultur züchtet – und das umso mehr, je organnäher die Kultur ist.



Ein vertikal durchgeschnittener Mikrocontainer voller Mäuse-Fibroblasten: Das sind leicht kultivierbare Zellen, die Bindegewebe bilden. Die hier mechanisch hergestellten Poren im Boden sind zwar nur etwa doppelt so weit wie die gelaserten, erwiesen sich aber als noch zu groß für diese Zellart, denn einige Zellen konnten sich hindurchzwängen und die Unterseite der Struktur besiedeln.

ABBILDUNGEN: FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE



Feinere, gelaserte Poren erwiesen sich als günstiger. Damit das Nährmedium besser von unten den Boden durchströmen kann, wurden zusätzliche Poren geschossen. Im Mikrocontainer wuchsen menschliche Leberzellen (Hepatocyten) einer schon lange im Labor kultivierten Zell-Linie.

damit typische Leberfunktionen wie die Synthese des Blutproteins Albumin sowie die Entgiftung von Ammoniak aufrechtzuerhalten sind; klinische Untersuchungen stehen aber noch aus.

Ebenfalls noch nicht klinisch erprobt sind Modelle, bei denen man die Zellen auf Netzen oder Schwämmen aus Kunststoff kultiviert. Günstig ist, dass solche Reaktoren von vornherein dreidimensional konfiguriert sind. Zudem kann man das Gerüst wieder mit bestimmten Substanzen wie Kollagen beschichten, um das Anheften der Zellen zu unterstützen.

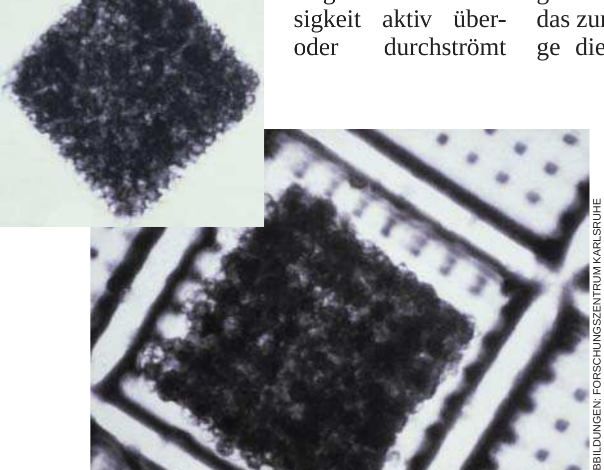
Vor allem aber erbringen Hepatocyten in dreidimensionaler Kultur bessere Stoffwechselleistungen als in Monolayern. Das zeigten auch entsprechende eigene Versuche. Uns war deswegen am Forschungszentrum Karlsruhe schnell klar, wie ein aus unserer Sicht ideales System beschaffen sein müsste – ideal zumindest in wesentlichen Merkmalen. Zum einen wollten wir die Hepatocyten in definierter Zahl beziehungsweise Schichtdicke kultivieren; zum anderen sollte die Schicht bei kurzen Versorgungswegen mit Nährflüssigkeit aktiv über- oder durchströmt werden können, damit die Diffusion von Stoffen nicht beschränkt wäre. Diesen Anforderungen entsprechend entwarfen wir ein Raster von Mikrocontainern, wobei wir uns an physiologischen Werten orientierten: Die mittlere freie Weglänge zwischen zwei Blutkapillaren beträgt rund einen drittel Millimeter; folglich kann eine halb so dicke Gewebeschicht noch durch Diffusion von einer Seite aus versorgt werden. Damit stand das Grundmaß für ein einzelnes Rasterelement fest.

Ein Chip für die Kultur

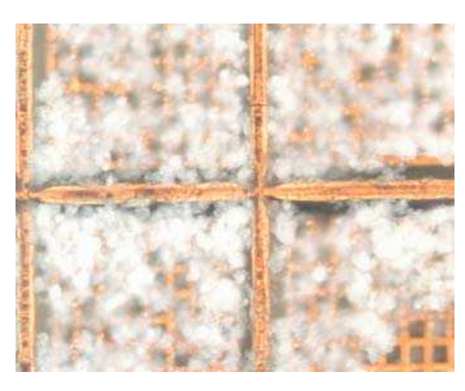
Bei der Materialauswahl entschieden wir uns für Polymethylmethacrylat und Polycarbonat, also Polymere, die sich in Heißpräge- und Mikrospritzgussverfahren gut verarbeiten lassen. Mit diesen Techniken werden bei uns am Forschungszentrum Karlsruhe routinemäßig Mikrostruktur-Komponenten für unterschiedliche Anwendungen produziert. So brauchten wir sie nur für unseren Zweck zu adaptieren: Rechnergesteuerte Präzisionsmaschinen mit Diamantfräsen fertigen das Abformwerkzeug aus Messing, das zur Herstellung der Kunststoffrohlinge dient. Die für die Zellkultivierung konstruierte Rasterplatte besteht aus kubischen Abteilen mit jeweils einer Kantenlänge von 300 Mikrometern und einer Wandstärke von fünfzig Mikrometern. Auf eine Fläche von rund einem Quadratzentimeter passen also 900 solcher Mikrocontainer – je dreißig pro Reihe und Spalte.

Die Böden der Mikrocontainer wollten wir mit Poren versehen, damit sich das Kulturmedium hindurchpumpen, perfundieren lässt. Im Mikrospritzguss ist dies allerdings nicht zu bewerkstelligen. Darum sahen wir Rohlinge mit pyramidenförmig strukturierten Böden vor, die wir punktuell öffneten, indem wir den Kunststoff von der Gegenseite her bis zu den Pyramidenspitzen abfrästen. Das war jedoch sehr zeitaufwendig, somit für größere Stückzahlen ungeeignet. Viel schneller konnten wir mit dem Strahl eines Excimer-Lasers die Spitzen durchlöchern: zwischen 10 000 und 100 000 Stück pro Minute (siehe Fotos oben). Die feinen, etwa zweieinhalb Mikrometer weiten Perfusionskanäle gewährleisten eine sehr gute Versorgung der Zellen (Foto oben rechts).

Eine weitere Möglichkeit, Kanäle definierter Weite zu erzeugen, ist ein Beschuss mit Schwerionen, gefolgt von ei-



ABBILDUNGEN: FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE



Frisch aus Ratten isolierte Leberzellen, in einer Rasterplatte aus nacktem Kunststoff kultiviert, verbanden sich zwar miteinander, hafteten aber nicht an dem Material (links). Das kubische Zellaggregat ließ sich im Ganzen mit einem sanften Strahl ausschwemmen (kleines Bild). Eine zellfreundliche Beschichtung mit dem Faserprotein Kollagen erleichtert den Zellen das Anheften (rechts).

nem Ätzvorgang. Die schnellen Ionen können aber nicht gezielt auf so feine Details wie die Pyramidenspitzen gelenkt werden. Die Öffnungen verteilen sich hier deshalb zufällig über die Bodenfläche.

Die lebenden Zellen, die wir auf solchen Strukturen kultivieren wollten, reagieren freilich recht unterschiedlich auf die künstlichen Materialien. Fibroblasten von Mäusen etwa – das sind Bindegewebszellen – heften sich problemlos an die gewählten Polymer-Kunststoffe an. Andere Zellarten hingegen, insbesondere frisch isolierte Hepatocyten, sind da anspruchsvoller. Deswegen mussten wir die Polymeroberflächen noch modifizieren.

Konventionell lassen sich beispielsweise mit wässrigen Lösungen Schichten von Kollagen, Fibronectin, Laminin und ähnlichen biologischen Substanzen aufbringen, die für Leberzellen attraktiv sind. Ein weiteres Verfahren – *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* genannt – bringt durch kalte Gasentladungen Prozessgase in einen sehr reaktiven Zustand. Mit Stickstoff als Gas können so Amino- und Imino-Gruppen als zellfreundlicher Haftgrund angelagert werden. Bei Sauerstoff werden die Oberflächen geätzt, gesäubert und sterilisiert.

Interessant ist auch der Einsatz von Prozessgasen, die beim Abscheiden auf den Mikrostrukturen polymerisieren – etwa Oligoethylenglycol zu Polyethylenglycol. Diese Glycole wirken zellabweisend. Wir können mit ihnen ausgewählte Stellen freihalten und die umliegenden Zellen zwingen, statt in die Breite in die Höhe zu wachsen. Ferner können wir mit einer speziellen Technik sogar kurze Ketten aus drei bestimmten Aminosäuren auf die vorbehandelte Oberflächenschicht aufbringen. Daran verankern sich dann die Zellen mit besonderen Haftmolekülen.

Unsere ersten Kulturversuche stellten wir probeweise mit Mäusezell-Linien an, denn diese schon lange im Labor gezüchteten Zellen jeweils einer Sorte sind in der Regel weniger anspruchsvoll als frisch aus Organen gewonnene Pendants. Das Ergebnis war erfreulich: Mäuse-Fibroblasten hefteten sich problemlos an die Oberfläche unserer Gitter-Prototypen. Die beimpften Strukturen legten wir anfangs einfach in Schalen mit Nährflüssigkeit; dennoch wurden die Zellen offenbar allein durch Diffusion hinreichend versorgt: Sie besiedelten zunächst die Wände und Böden der Abteile und füllten dann durch weitere Teilungen nach und nach deren ganzen Hohlraum aus. Jeder vollständig bewachsene ▶

Nicht-biologische Systeme zur Leberentlastung

Anleihen bei der Blutwäsche

Eines der ältesten Verfahren zur Entlastung der Leber ist die so genannte Hämodialyse, wie sie ähnlich auch bei Nierenversagen angewandt wird. Dabei treten abzubauende Stoffe aus dem Blut durch eine semipermeable Membran in eine Elektrolytlösung über, größere Proteinmoleküle jedoch nicht. Schon Mitte der fünfziger Jahre wurden damit Patienten behandelt, die infolge teilweisen Ausfalls der Leber an Ammoniakvergiftung litten. Die dafür typischen Störungen der Hirnfunktion besserten sich zwar, doch überlebte keiner der Erkrankten längere Zeit.

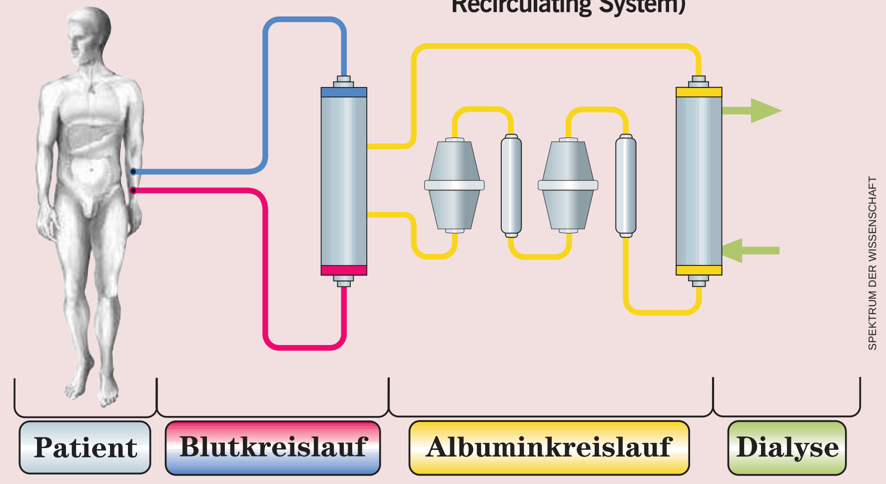
Bei der so genannten Hämoperfusion wird das Blut hingegen durch Aktivkohle gefiltert, deren große interne Oberfläche begierig Moleküle adsorbiert. Dabei gehen jedoch auch zahlreiche Blutplättchen verloren. Zudem sinkt der Blutdruck beträchtlich – wahrscheinlich weil regulierende Substanzen aus dem Blut entfernt werden. Bei der Behandlung des Leberversagens darf das Blut deshalb nicht in direkten Kontakt mit den Filtern kommen. Am Londoner King's College Hospital haben Ärzte 1972 ein System getestet, bei dem die Kohle in das Blutprotein Albumin eingehüllt war. Von 22 Patienten mit rapidem Leberversagen konnten daraufhin zehn entlassen werden. Im Vergleich zu der zehnprozentigen Überlebensrate ohne Behandlung erschien dies ein ermutigendes Ergebnis. Ein anderes Team derselben Klinik erzielte aber 1988 in einer Studie an 137 Patienten keine signifikante Verbesserung; darum ist auch diese Methode nie in großem Maßstab angewendet worden.

Amerikanische Fachärzte vom St. Elizabeth Hospital in Lafayette (Indiana) berichteten 1991 von Erfolgen mit der Hämodiadsorption, einer Kombination von Hämodialyse und Aktivkohle-Adsorption, bei acht von 15 Patienten. Jan Stange und seine Kollegen vom Universitätsklinikum Rostock setzen auf eine Kombination von Nieren- und Leberdialyse. Das System besteht aus drei gekoppelten Kreisläufen (siehe Grafik unten). Bei neun von 13 Patienten ihrer Studie von 1997 besserte sich der Zustand deutlich.

Schließlich haben 1982 Zhi-Qing Shi und Thomas Zhang an der Mc-Gill-Universität in Montreal (Kanada) eine Blutreinigung mit isolierten Leberenzymen im Labor erprobt, die entweder an unlösliche Träger gebunden oder in „künstliche Zellen" verpackt waren. Die Anwendung ist aber begrenzt, weil nur sehr wenige der erforderlichen Enzyme zur Verfügung stehen. Außerdem entgiften diese Systeme nur, stellen aber keine nötigen Proteine wie Albumin her.

Für alle jemals publizierten Systeme gilt: Nur ein Teil gab immerhin so viel Anlass zu Hoffnung, dass weitere klinische Tests mit ihnen durchgeführt werden. Manche verwendet man inzwischen als Komponenten in biologischen „Kombisystemen".

Prinzip der MARS-Technik (Molecular Adsorbents Recirculating System)



Im ersten Kreislauf fließt das Blut des Patienten an einer halbdurchlässigen Membran vorbei. Auf der anderen Seite zirkuliert eine Albumin-Lösung; sie nimmt unter anderem die vom Patienten-Albumin transportierten und nun übertretenden Giftstoffe auf. Diese werden dann im dritten, dem Dialysekreislauf wieder vom Albumin abgetrennt, sodass sich das Protein regeneriert.

„CellChip“ beherbergte schließlich ungefähr vier Millionen Fibroblasten.

Als günstig erwies sich, dass manche Zell-Linien an den Oberkanten der Gefache die Teilung einstellten. Dies ermöglicht uns, Gewebeschichten begrenzter Dicke zu kultivieren. Bei zu dicken Lagen würden Zellen im Inneren infolge Nährstoff- und Sauerstoffmangels absterben.

Mikroskopische Untersuchungen zeigten allerdings, dass die durch Abfräsen geschaffenen, etwa fünf Mikrometer weiten Poren im Boden der Prototyp-Container zu groß waren; denn etliche Fibroblasten hatten sich, obwohl ihr Durchmesser immerhin etwa 15 Mikrometer beträgt, hindurchgezwängt und auf der Außenseite einen dünnen Teppich gebildet (siehe Foto Seite 48 links oben). Dieser Effekt war zwar nicht erwünscht, ermöglicht aber eventuell andere als von uns beabsichtigte Anwendungen: etwa eine zweidimensionale Kultur einer Zellsorte außen und eine dreidimensionale Kultur einer anderen Sorte innen. Für unsere Zwecke stellten wir jedoch fortan die Rasterplatten mit engeren, gelaserten Perfusionskanälen her.

Mit diesen Erfahrungen gingen wir daran, die apparative Peripherie aufzubauen. Vorrangig dabei war, das heranwachsende Gewebe in seinen Mikrocontainern gezielt mit Nährmedium zu versorgen. Prinzipiell bestehen dafür zwei Möglichkeiten: das Durchströmen (Perfusion) und das Überströmen (Superfusion). Im einfachsten Fall kann die Peripherie aus einer Art Kapsel, einem Mediumspeicher und einer Umwälzpumpe, bestehen.

Wir entwickelten ein Gehäuse mit je zwei alternativen Anschlüssen für die Zu- und Abfuhr der Nährlösung. Es ist mit Mikroskopie-Deckgläsern verschlossen, damit wir die Zellen jederzeit mikroskopisch beobachten können (siehe Fotos unten). Der Innenraum ist so konstruiert, dass ihn die eingeschobene mikrostrukturierte „Kulturplattform“ unterteilt wie ein Backblech den Ofen. Wahlweise kann das Gewebe horizontal überströmt oder durch die Kanäle im Boden der Platte vertikal versorgt – also perfundiert – werden. Vorgesehen haben wir außerdem Messfühler für Sauerstoff, Kohlendioxid, Druck und weitere Parameter. Dass die Kulturbedingungen in dieser Art von Mini-Bioreaktor genau einzustellen sind, macht ihn vielfältig einsetzbar.

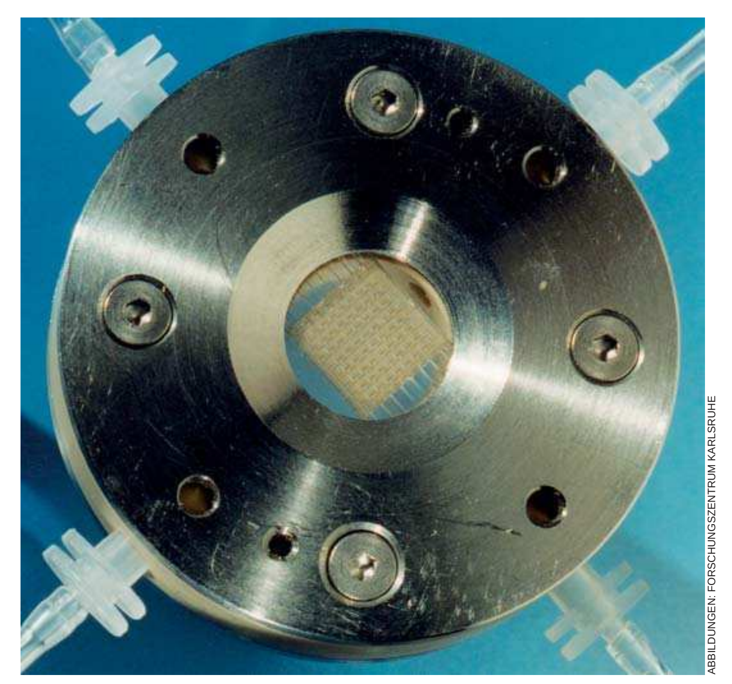
Raffinierte Reaktoren für Ratten

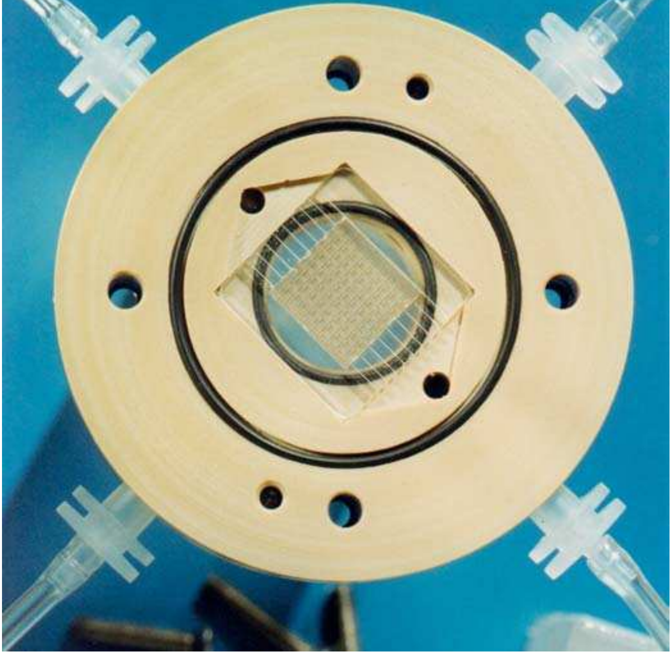
In dem einfachen System unterzogen wir nun unsere Rasterplatten mit den feineren, den „gelaserten“ Perfusionskanälen ersten Tests. Kultiviert wurden diesmal menschliche Hepatocyten einer HepG2 genannten Zell-Linie. Erfreulicherweise wuchsen sie ausgeprägt dreidimensional, ohne die Mikrocontainer durch die engen Bodenöffnungen zu verlassen. Die Poren, deren Zahl wir noch vergrößert hatten, verstopften auch nicht, da das Nährmedium von unten her einströmte. Zugleich haftete das neugebildete Gewebe so fest am Untergrund, dass die einströmende Flüssigkeit es nicht ausschwemmte.

Auf Grund dieses Erfolges gingen wir zu noch etwas anspruchsvolleren Zellen über: zu frisch isolierten und gereinigten Hepatocyten, vorerst aus Ratten. Zunächst stellten wir Versuche mit einer unbeschichteten Kulturplattform aus Polymethylmethacrylat an. Wir füllten diesmal die Mikrocontainer vollständig mit losen Zellen und kultivierten diese dann noch einige Tage. Der interessante Effekt war, dass die Zellen sich zwar untereinander verbanden, aber ihren Kunststoffkubus als Ankerplatz verschmähten. Vielmehr bildeten sie entsprechend seiner Form würfelige Aggregate (siehe dazu die Fotos auf Seite 48 links unten). Mit einem Strahl Nährflüssigkeit konnten wir diese Kuboide, wie wir sie nannten, sogar unbeschädigt ausschwemmen. Solche Zellaggregate von gleichmäßiger Gestalt und Größe lassen sich mit herkömmlichen Methoden kaum herstellen. Möglicherweise sind sie für die Pharmaforschung interessant.

Uns ging es aber um Zellen, die gut an den Flächen hafteten. Als wir das Kunststoffmaterial mit adhäsionsför-

Prototyp eines Mini-Bioreaktors mit einem „CellChip“ als Modul: Durch Deckgläser am Gehäuse lassen sich Zellen in den Mikrocontainern mikroskopisch beobachten (links). Über die vier Anschlüsse kann die Zellkultur wahlweise horizontal mit Nährmedium überströmt oder vertikal durchströmt werden. Im geöffneten Reaktor (rechts) sind zwischen den beiden Dichtungsringen zwei der vier Kanäle für die Zu- und Abfuhr des Mediums zu erkennen.





ABBILDUNGEN: FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Testsystem eines Bioreaktors mit mehreren gestapelten „CellChips“: In rund drei Kubikzentimeter Raum können bis zu vierzig Rasterplatten untergebracht und darin 200 bis 250 Millionen Zellen kultiviert werden. Dies sollte reichen, die Leber einer Laborratte zeitweise zu ersetzen. Das Gehäuse ist hier geöffnet und nur teilweise bestückt. Sensoren und Filtersysteme sind vorgesehen.

dernden Substanzen wie Kollagen beschichteten, fanden die primären Hepatocyten dann auch an den Containerwänden Halt (siehe Foto auf Seite 48 rechts unten).

Zur extrakorporalen Leberunterstützung benötigt man freilich, wie erwähnt, mindestens zehn Prozent des Organgewichts an Zellmaterial. Um zu sehen, ob ein erweitertes System an kleinen Labortieren funktioniert, bedarf es zunächst eines Reaktors, der gerade so viel Zellen fasst, dass er beispielsweise für Laborratten eingesetzt werden kann. In einem ersten Schritt hin zu praxistauglichen Geräten konstruierten wir deshalb einen Prototyp eines Bioreaktors mit wenigen Modulen; in ihm können bis zu vierzig unserer Mikrostrukturen übereinander gestapelt werden (Foto oben). Er enthält damit in weniger als drei Kubikzentimetern 200 bis 250 Millionen Zellen; dies ist ein sehr viel günstigeres Verhältnis als bei unseren ersten Modellen, zumal auch geringere Mengen an Nährmedium gebraucht werden. Mehr noch: Je kompakter das Ganze, desto weniger Blutplasma wird sich jeweils außerhalb des Körpers durch das Gerät bewegen müssen. Dies reduziert zugleich den Bedarf an Plasmaexpandern. Die Gesamtzahl an Zellen im 40-Modul-Bioreaktor sollte ausreichen, zumindest die Leberfunktion einer Ratte zu gewährleisten.

Ein Bioreaktor dieses Typs, noch ohne die einmal anzukoppelnden Filtereinheiten für das Blutplasma, befindet sich gerade in der technischen Erprobung. Funktionstests mit Ratten-Hepatocyten in einem ähnlichen älteren System haben wir bereits durchgeführt. Wenn der Reaktor das leistet, was wir uns von ihm versprechen, wollen wir Ratten experimentell behandeln, deren Leber zuvor entfernt wird. Zu prüfen ist dabei unter anderem, in welchem Maße die kultivierten Zellen Plasmaproteine – vor allem Albumin – produzieren und wie aktiv bestimmte entgiftende Enzymsysteme sind. Vorläufigen Befunden zufolge bleiben die Mikrocontainer-Kulturen sehr viel länger enzymatisch aktiv als Monolayer – und mindestens ebenso lange wie so genannte Sphäroide, kugelige Klümpchen aus solchen Zellen, mit denen unter anderem auch unsere Arbeitsgruppe langjährige Erfahrung besitzt.

Noch ein weiter Weg bis zur Kunstleber

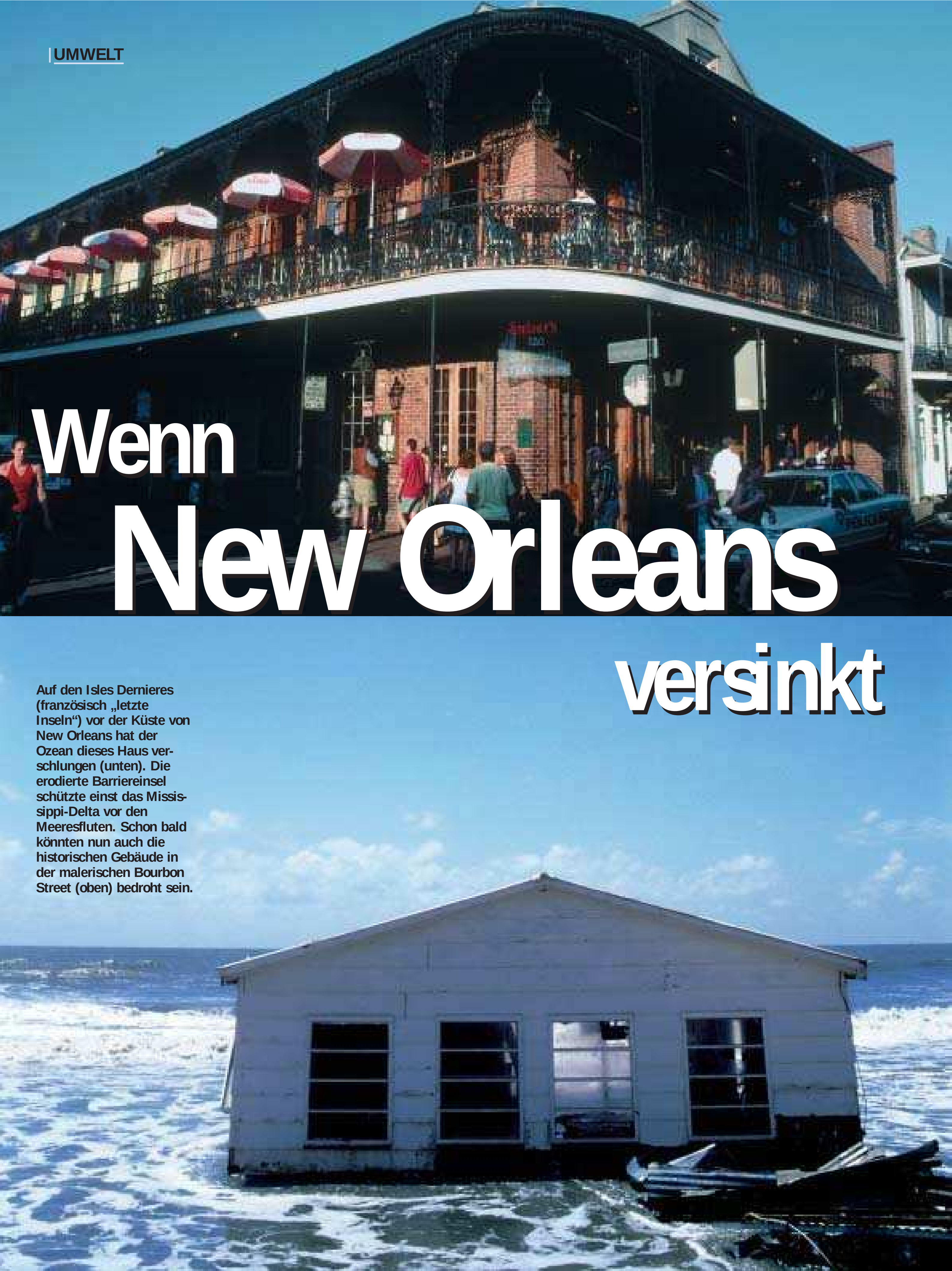
Diese Ergebnisse gilt es in nächster Zeit zu untermauern, um schließlich mit der Entwicklung größerer Geräte für den Menschen beginnen zu können. Für eine klinische Anwendung wären rund 5000 unserer Mikrostrukturen im derzeitigen Design erforderlich. Diese enorme Zahl würde aber die Logistik am Institut überfordern, da sowohl personell als auch maschinell solche Stückzahlen in der Produktion nicht vorgesehen sind. Wir brauchen daher externe Partner.

Neben reinen Hepatocyten-Kulturen wollen wir Mischkulturen erproben, zum Beispiel Hepatocyten kombiniert mit Zellen, die gewöhnlich die Blutgefäße in der Leber auskleiden. Orientierende ältere Versuche am Institut zeigten, dass diese Zellen durch Selbstorganisation erstaunlich geordnete Strukturen zu bilden vermögen. Könnten wir diese Fähigkeit nutzen, um in bioartifiziellen Systemen im Idealfall Blutkapillaren entstehen zu lassen, dann hätten wir quasi natürliche Versorgungswege mitten durch die Gewebeblöckchen – eine Perfusion durch biologische Kanäle. Damit wäre man auf dem Wege zur künstlichen Leber einen großen Schritt weiter. Vorerst streben wir aber mit den Mischkulturen nur organähnlichere Verhältnisse an.

Die zeitweilige Unterstützung bei akutem Leberversagen ist zwar unser primäres Ziel. Doch lassen sich auch andere klinische Anwendungen biohybrider Systeme vorstellen. Dazu gehören etwa die Vermehrung von Knochenmarkszellen und die Züchtung von Dünndarm- oder Hautgewebe. Die Möglichkeit, Zellaggregate von vorgegebener Schichtdicke und Form zu gewinnen, dürfte ferner für die pharmazeutische Forschung und für Toxizitätstests mit unterschiedlichsten Wirkstoffen interessant werden. Rasterplatten wie unser „CellChip“ – mit 900 Mikrocontainern pro Quadratzentimeter – kommen dem Bestreben zur Miniaturisierung entgegen, weil sich damit Wirkstoffe in kleineren Mengen bei höherem Durchsatz prüfen lassen. Vielleicht sind sie künftig sogar in der medizinischen Diagnostik zu verwenden: zur automatisierten Untersuchung von jeweils einzelnen Zellen.

Unseren Mikrostrukturen für die Zellkultur werden sich also hoffentlich vielfältige Einsatzgebiete erschließen, zumal das Design höchst variabel ist. Zum Beispiel werden derzeit von uns schon Mikrocontainer mit glattem perforiertem Boden genutzt. Diese können für solche Zellen verwendet werden, die im Körper als einzellige Schicht wachsen. Dazu gehören auch die Zellen, welche die Blutgefäße als so genanntes Endothel auskleiden. Damit ließen sich komplexere Gewebe züchten: als erste Lage ein einschichtiges Endothel und darüber ein dreidimensionales Aggregat von spezifischen Funktionszellen eines bestimmten Organs, etwa der Leber, des Dünndarms, des Knochens oder der Haut. Das flächige Endothel dient dann als selektive Barriere zwischen Blutplasma und Gewebe, wobei eine künstliche Membran beide trennt. ■

***Eric Gottwald** arbeitet seit 1996 am Institut für Medizintechnik und Biophysik am Forschungszentrum Karlsruhe und leitet dort seit 2000 die Arbeitsgruppe Biologie. Nach seinem Biologiestudium an der Universität zu Köln promovierte er 1995 am Institut für Pharmakologie. Seine derzeitigen Forschungsschwerpunkte: die Weiterentwicklung von dreidimensionalen Kultursystemen auf der Basis mikrostrukturierter Träger sowie die möglichen Auswirkungen elektromagnetischer Ströme und Felder auf Säugerzellen.*



Wenn New Orleans versinkt

Auf den Isles Dernieres (französisch „letzte Inseln“) vor der Küste von New Orleans hat der Ozean dieses Haus verschlungen (unten). Die erodierte Barriereinsel schützte einst das Mississippi-Delta vor den Meeresfluten. Schon bald könnten nun auch die historischen Gebäude in der malerischen Bourbon Street (oben) bedroht sein.

Viele Städte der Erde, die an Flussmündungen liegen und allmählich versinken, könnten durch schwere Hurrikane überflutet und verwüstet werden. Am Beispiel der Großstadt New Orleans an der Mündung des Mississippi haben Forscher jetzt die Auswirkungen solcher Naturkatastrophen im Detail analysiert.

Von Mark Fischetti

Drei Meter hoch stapeln sich die Kartons an den Wänden des großen, fensterlosen Raums. Darin verpackt lagern fabrikneue Leichensäcke – zehntausend an der Zahl. Ein kräftiger Hurrikan, der auf der richtigen Route langsam über den Golf von Mexiko zöge, würde eine gewaltige Flutwelle vor sich herschieben. Diese könnte New Orleans sechs bis sieben Meter tief unter Wasser setzen. „Wenn sich das Wasser anschließend zurückzieht", sagt Walter Maestri, Leiter des städtischen Katastrophenschutzes, „rechnen wir mit sehr vielen Toten."

New Orleans wartet auf die Katastrophe. Die Stadt am Mississippi-Delta liegt in einer Senke unter dem Meeresspiegel. Deiche halten den Lake Pontchartrain im Norden und den Mississippi im Süden und Westen ab. Bedingt durch das unglückliche Zusammentreffen verschiedener Faktoren sinkt die Stadt weiter ab. Damit erhöht sich aber die Überflutungsgefahr selbst nach schwächeren Stürmen. Das flache Mississippi-Delta, das die Stadt zum Meer hin schützt, schrumpft zusehends. In einem Jahr werden dort abermals sechzig bis siebzig Quadratkilometer Marschland verschwunden sein.

Etwa alle zwei Stunden geht ein Hektar Land verloren. Mit jedem weggespülten Stück steigt die Gefahr, dass eine Flutwelle über das Delta schwappt und die Senke von New Orleans überschwemmt. Dadurch würden eine Million Stadtbewohner sowie eine weitere Million Menschen in den umliegenden Gemeinden von der Außenwelt abgeschnitten. Eine allgemeine Evakuierung wäre unmöglich. Die wenigen Fluchtwege wären durch die Fluten unterbrochen. Wissenschaftler der Universität des US-Bundesstaates Louisiana (LSU) haben im Computermodell bereits Hunderte möglicher Sturmverläufe simuliert. Nach ihren Vorhersagen könnte es mehr als 100 000 Todesopfer geben. Der Vorrat an Leichensäcken würde dann nicht lange reichen.

Eine Katastrophe scheint somit unausweichlich: Jedes Jahr ziehen in unmittelbarer Nähe der Stadt kräftige Wirbelstürme vorbei. 1965 setzte der Hurrikan Betsy Teile von New Orleans fast drei Meter tief unter Wasser. Der gewaltige Hurrikan Andrew verfehlte die Stadt 1992 nur um etwa 150 Kilometer. 1998 drehte Georges im letzten Moment nach Osten ab, hinterließ aber dennoch Schäden in Milliardenhöhe. Ursächlich dafür sind natürliche Prozesse, die durch menschliche Eingriffe künstlich beschleunigt wurden: Ausbaggern von Flüssen, Trockenlegen von Feuchtgebieten, Graben von Kanälen und Entwässerungsrinnen in Marschland (siehe Grafik Seite 56/57).

Dennoch sehen Wissenschaftler und Ingenieure in weiteren Eingriffen die einzige Chance auf Rettung. Sie sind sich allerdings nicht darüber einig, welche der vorgeschlagenen Projekte durchgeführt werden sollen. Wenn nicht gehandelt wird, so warnen Experten der LSU, wird das schützende Delta des Mississippis bis 2090 verschwunden sein. Die tiefer gesunkene Stadt wird dann direkt am Meer liegen – im günstigsten Fall als ein zweites Venedig, im schlimmsten Fall als ein modernes Atlantis.

Als wäre die Gefährdung zahlreicher Menschenleben nicht schon schlimm genug, hat die potenzielle Überflutung von New Orleans auch ernsthafte Konsequenzen für Wirtschaft und Umwelt. Von der Küste Louisianas stammt ein Drittel der in den USA gefangenen Fische und Meeresfrüchte, landesweit wird hier ein Fünftel des Rohöls und ein Viertel des Erdgases gewonnen. In Louisiana liegen vierzig Prozent der küstennahen Feuchtgebiete und siebzig Prozent der Überwinterungsplätze für Wasservögel, die es in den USA insgesamt gibt.

Die Anlagen am Mississippi zwischen New Orleans und Baton Rouge bilden zusammen den größten Hafen des Landes. Und schließlich ist das Delta auch für die Seele der US-Amerikaner von großer Bedeutung. Jazz und Blues haben hier ihren Ursprung, hier ist die Quelle des Cajun – der Kultur und Musik der frankophonen Bevölkerung – und des Kreolischen. Hier ist auch der Karneval zu Hause. Die Bundesregierung in Washington hat jedoch bisher Forderungen nach Hilfe stets abgelehnt.

Dabei wäre die Rettung des Mississippi-Deltas ein wertvoller Präzedenzfall, nicht nur für die USA, sondern weltweit. Küstenmarschen verschwinden auch

- in anderen Anrainerstaaten des Golfs von Mexiko,
- entlang der US-Ostküste in der Bucht von San Francisco sowie
- im Mündungsbereich des Columbiastroms.

Die Gründe dafür sind ähnliche wie in Louisiana. Teile der Stadt Houston versinken derzeit sogar schneller als New Orleans. Große Deltas in anderen Weltgegenden befinden sich heute in ähnlichem Zustand wie das Mississippi-Delta vor hundert oder zweihundert Jahren. Dies gilt beispielsweise für das Orinoco-Delta in Venezuela, das Nil-Delta in Ägypten oder das Mekong-Delta in Vietnam.

Erfahrungen aus New Orleans könnten helfen, Richtlinien für eine behutsamere Entwicklung all dieser Regionen zu erstellen. Die USA könnten ihre Rückbautechnologie in alle Welt exportieren. In Europa verlieren die Deltas von Rhein, Rhône und Po ständig Land. Falls die globale Erwärmung in diesem Jahrhundert zu einem deutlichen Anstieg des Meeresspiegels führt, müssen unzählige ▶

AC FOTODESIGN / F1 ONLINE

ALLE WEITEREN FOTOS DES ARTIKELS: MAX AGUILERA-HELLWEG

Küstenstädte Schutzmaßnahmen ergreifen, wie sie für Louisiana bereits vorgeschlagen wurden.

Shea Penland gehört zu den Leuten, die am besten wissen, was im Delta los ist. Der Geologe forscht heute an der Universität von New Orleans, verbrachte aber 16 Jahre an der LSU. Er arbeitet im Auftrag des Ingenieurkorps der US-Armee, das für die Errichtung der Deiche zuständig ist. Außerdem sitzt er in Arbeitsgruppen des Bundes und von Louisiana, die Küstenrückbauprojekte durchführen, und er berät die Öl- und Gasindustrie. Vor allem aber kennt er überall im Delta Leute, die an sumpfigen Flussarmen und auf Marschen leben – diejenigen also, die tagtäglich vor Ort den Verfall der Küstenlandschaft erleben.

An diesem Maimorgen packt mich Shea Penland in seinen klapprigen Pick-up. Der Geologe will mir zeigen, warum das achtzig Kilometer lange Feuchtgebiet südlich von New Orleans bereits im Sterben liegt. Über Jahrhunderte hinweg errichtete der Mississippi sein flaches Delta im Südosten Louisianas, indem er bei Springfluten regelmäßig riesige Sedimentmengen ablagerte. Zwar trockneten Sand und Schlick anschließend allmählich ab, wurden unter ihrem eigenen Gewicht zusammengedrückt und senkten sich. Doch schon bei der nächsten Flut wurden die Sedimentschichten wieder erneuert. Auf Anweisung des Kongresses haben jedoch seit 1879 die Ingenieure der US-Armee den Fluss nach und nach eingedeicht.

Dies sollte die Überflutung von Städten und Industrieanlagen verhindern. Heute ist der Fluss vom Norden Louisianas bis hin zum Golf von Mexiko gezähmt. Seitdem ist aber die Sedimentzufuhr unterbrochen und der Landstrich sank unter die Linie, bis zu der bei Flut Meerwasser vordringt. Mit dem Verschwinden der Feuchtgebiete ging auch der Schutz verloren, den New Orleans bislang vor dem Meer hatte. Zwar kann die Flutwelle eines Hurrikans mehr als acht Meter hoch werden. Doch ihre Höhe reduziert sich um jeweils einen Meter, wenn sie über den etwa zwanzig Kilometer breiten Streifen Marschland fließt. Denn eine lebende Marsch saugt reichlich Wasser auf.

Verlassene Bordelle an überfluteten Flussarmen

Auch heute noch wirkt das flache Marschland vor den Toren von New Orleans wie ein Schwamm. Die Landschaft ändert sich ständig. Flache Süßwassertümpel wechseln sich mit grünen Marschwiesen und Zypressensümpfen ab. Von den Bäumen hängt reichlich spanisches Moos herab, Zeichen für hohe Luftfeuchtigkeit. Als ich mit Penland etwa die Hälfte der Strecke zum Golf zurückgelegt habe, reißt das Marschland auseinander. Es ist mit Wasser vollgesogen. Wir fahren über einsame Straßen auf Steindämmen, passieren verrostete Wohnwagen und verlassene Bordelle. Einst standen sie an Flussarmen, die jetzt überflutet sind. Gruppen von kahlen, toten Bäumen ragen aus dem braun gefärbten, abgestorbenen Gras.

In Port Fourchon, wo zerstörtes Marschland schließlich in den offenen Golf von Mexiko übergeht, werden Absenkung und Erosion besonders auffällig. Die wenig befahrene Straße verbindet nur noch eine Ansammlung trostloser Wellblechbauten mit der Außenwelt. Öl- und Erdgaspipelines, die von einigen hundert küstennahen Quellen kommen, treffen hier zusammen. Zahllose Bohrplattformen bilden dort draußen einen finsteren Wald aus Stahl, der aus dem Wasser wächst. Um die Rohstoffe an Land zu pumpen, haben die Förderunternehmen viele hundert Kilometer lange Schifffahrtskanäle und Pipelinegräben durch die Küsten- und Binnenmarsch gezogen. Mit jedem Durchstich geht Land verloren, Schifffahrt und Gezeiten waschen die Ufer zusätzlich aus.

„Im Durchschnitt erodiert ein Strand in den USA um etwa sechzig Zentimeter pro Jahr“, sagt Penland. Doch Port Fourchon verliert jährlich rund 15 Meter Land – die schnellste Erosionsrate des ganzen Landes. Über das Kanalnetz dringt vermehrt Salzwasser in die Binnenmarschen, die dadurch versalzen. Gräser und Niederwald sterben von den Wurzeln her ab. Es bleibt keine Vegetation übrig, um Wind und Wasser daran zu hindern, die Marschen abzutragen. In einer von der Öl- und Erdgasindustrie finanzierten Studie kam Penland zu dem Schluss, dass die Industrie ein Viertel des Landverlustes im Mississippi-Delta verursacht hat.

Die Brüder Toby und Danny Duet, zwei von Penlands Freunden, die am Weg wohnen, wissen aus erster Hand zu berichten, welche Faktoren den Landverlust beschleunigen – über die natürliche Absenkung hinaus. Die beiden leben auf einem beigefarbenen, knapp zwanzig Meter langen Hausboot. Es ankert inmitten einer vierzig Quadratkilometer großen, kranken Marsch, etwa dreißig Kilometer nordwestlich von Port Fourchon. Ihre Familie pachtete das Land vor 16 Jahren von den Firmen, die etwa ein Dutzend über die Marsch verteilte Ölquellen betreiben.

Damals war das Gebiet einfach nur feucht, die Familie konnte dort fischen und jagen. Heute liegt es zwei bis drei Meter unter Wasser. Die Brüder filtern Regenwasser, um es trinkbar zu machen, bereiten ihr eigenes Abwasser auf und ernähren sich von dem, was sie aus dem Wasser fischen. Geld verdienen sie, indem sie Gruppen von Angelsportlern bei sich übernachten lassen. Toby holt uns per Boot ab. Während wir durch einen Kanal in Richtung Hausboot fahren, sagt er: „Früher konnte ich in diesem Kanal an beide Ufer spucken. Heute fahren hier große Öltanker durch.“

In der Kajüte des Hausboots fährt Danny fort: „Am Rand des Kanals rammten wir vor zwei Jahren einen Holzpflock in den Schlamm, um unsere Alligatorfalle zu befestigen. Gestern kam ich dort wieder vorbei. Das Ufer hat sich seither von dem Pflock um sechs Meter verlagert. Das scheint nicht viel zu sein. Doch die Alligatoren sind verschwunden. Das Wasser ist zu salzig.“

Wenn die Marsch verschwindet, wird das Delta nur noch durch wenige kleine, vorgelagerte Inseln geschützt. Vor hundert Jahren waren sie noch Teil der Küstenlinie. Am nächsten Morgen fahren Penland und ich zur Marine-Arbeitsgruppe der Universität von Louisiana. Dieser wissenschaftliche Vorposten befindet sich in Cocodrie, einer von Wis-

Steckbrief

Warum eine sinkende Stadt retten?

➤ Das Mississippi–Delta kann zum Vorbild werden, was die Problemlösungen für andere gefährdete Flussdeltas, küstennahe Feuchtgebiete und Küstenstädte angeht.

➤ In und um New Orleans leben mehr als zwei Millionen Menschen. Die Stadt ist ein bedeutendes kulturelles Zentrum in den amerikanischen Südstaaten.

➤ Im Süden Louisianas werden landesweit ein Drittel des Fangs an Fisch und Meeresfrüchten eingebracht sowie ein Fünftel des Erdöls und ein Viertel des Erdgases gefördert.

➤ Am Mississippi, zwischen New Orleans und Baton Rouge, liegt zusammengenommen der größte Hafen der USA.

senschaftlern und Fischern bewohnten Wohnwagensiedlung an der Küste. Von dort laufen wir mit einem der grauen Forschungsboote der Arbeitsgruppe aus.

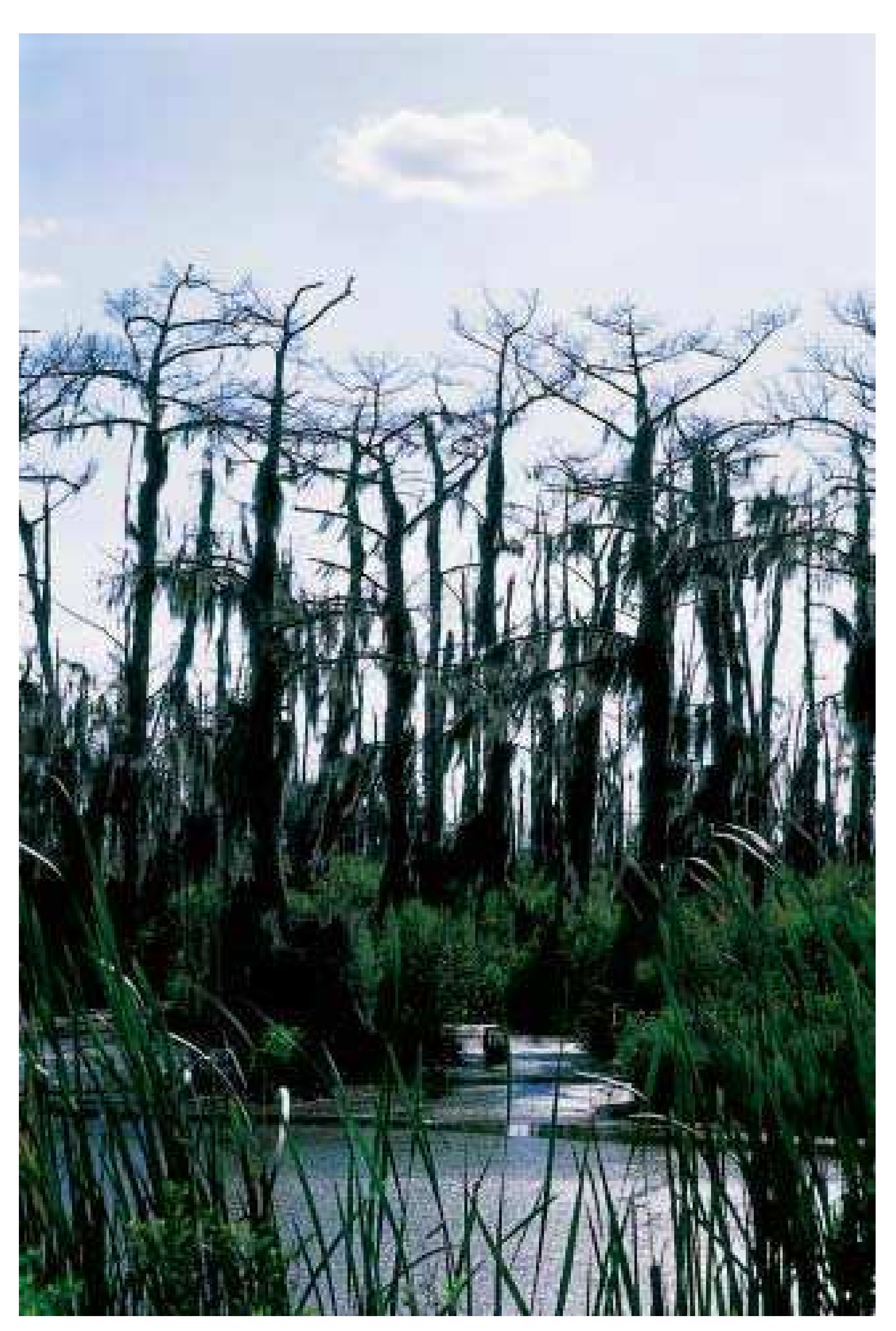
Das Boot stampft durch die Wellen, als wären wir schon auf dem offenen Meer. Doch das Wasser ist hier nirgends tiefer als zwei Meter. Auf diesem ausgedehnten Flachwassergebiet wuchs einst Gras, durch das der Wind strich. Dazwischen schlängelten sich schmale Wasserwege, in denen sich Krabben, Austern, Rotfische und Forellen tummelten.

Nach fünfzig Minuten erreichen wir die Isles Dernieres (französisch „letzte Inseln“). Shea Penland setzt das Boot am zum Festland gewandten Ufer der Insel in den Schlamm. Zu Fuß queren wir das etwa achtzig Meter breite Eiland, das lediglich aus unfruchtbarem Sand besteht, um den freien Ozean zu erreichen. Zu beiden Seiten tauchen in einiger Entfernung winzige Inseln auf – Reste der einst sehr langen, stabilen Landzunge, die mit schwarzen Mangroven üppig bewachsen war. „An dieser Nehrung brachen sich die Wellen des Ozeans, sie dämpfte die Sturmfluten und hielt Salzwasser fern, sodass sich dahinter die Marsch ungestört entwickeln konnte“, sagt der Geologe anklagend. Jetzt hat der Ozean die Herrschaft übernommen.

Vor Louisiana wurden diese Barriereinseln schneller abgetragen als vor anderen Küsten der USA. Millionen Tonnen Sediment wurden früher jedes Jahr durch die Mündung des Mississippis gespült und von küstenparallelen Strömungen bei den Inseln angeschwemmt. Was die Brandung abgetragen hatte, bauten sie wieder auf. Doch Deiche und Ausbaggerung hindern den Fluss auf den letzten Kilometern an einer natürlichen Mäanderbildung. Deshalb hat sich die Mündung auch weit zum Rand des Kontinentalschelfs hin vorgeschoben. Die Sedimente kippen jetzt einfach über die Kante des dortigen Unterwasser-Kliffs in die Tiefsee.

Am nächsten Tag sind wir wieder in New Orleans. Dort erfahre ich, dass andere menschliche Eingriffe das Problem noch verschlimmert haben. Cliff Mugnier ist Geodät an der LSU. Zeitweise arbeitet er auch für das Ingenieurkorps der US-Armee. Es residiert in einem rechteckigen Betongebäude, welches den Deich des Mississippis überragt, an dem das Korps 122 Jahre lang immer wieder gebaut hat.

Mugnier berichtet, dass der Boden unter dem Delta aus Schlammschichten besteht – einem feuchten, torfähnlichen Material, das mehr als hundert Meter tief reicht und über Jahrhunderte hinweg bei



Eindringendes Salzwasser zerstört die Zypressen in den Sümpfen südlich von New Orleans. Die Pflanzen sterben von den Wurzeln her ab. Dadurch erodieren die Sumpfgebiete, sodass Wasser aus dem Golf von Mexiko noch weiter landeinwärts vordringen kann.

Überschwemmungen abgelagert wurde. Nachdem das Korps den Fluss eingedeicht hatte, legten Stadt und Industrie große Marschflächen trocken, die zuvor als Ödland gegolten hatten.

Die Verhinderung von Überschwemmungen und die Drainage von Feuchtgebieten bedingten eine Absenkung des Grundwasserspiegels. Dadurch trockneten die oberen Schlammschichten aus, verfestigten und setzten sich. Dies führte zu einem beschleunigten natürlichen Absinken der Stadt, denn tiefer liegende Schichten verfestigen sich ohnehin mit der Zeit.

Aber damit nicht genug. Als die Senke sich vertiefte, wurde sie bei jedem heftigeren Regenguss überflutet. So legte das Korps in Zusammenarbeit mit dem städtischen Amt für Wasser und Abwasser ein Labyrinth von Kanälen an, die das Regenwasser aufnahmen. Dieses konnte man nur in den nahe gelegenen Pontchartrain-See leiten. Doch liegt dessen Seespiegel im Mittel ungefähr dreißig Zentimeter über dem Niveau der ▶

New Orleans – ein Untergang in Raten

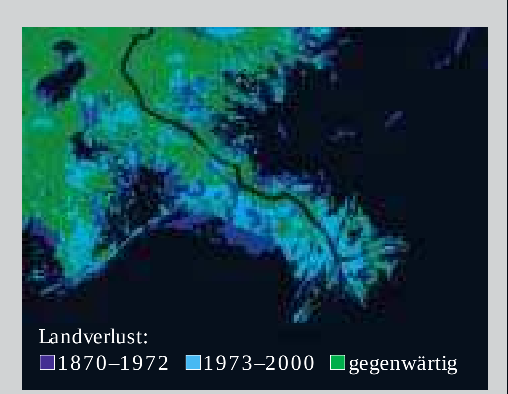
Menschen sind die Ursache dafür, dass im Südosten des US-Bundesstaates Louisiana zunehmend Land verloren geht. Zugleich wird die schrumpfende Küste durch Hurrikane gefährdet. Denn das Flussdelta sinkt weiter ab – ein Prozess, der sich durch Deichbauten noch beschleunigt hat. Große Gebiete der Region befinden sich heute nur noch knapp über dem Meeresspiegel. Pro Tag verschwinden 15 Hektar Land. Wenn dieser Prozess so fortschreitet, liegt New Orleans um das Jahr 2090 am offenen Meer.

Südosten von Louisiana

Der Südosten von Louisiana ist ein Testfall für bedrohte Feuchtgebiete in Küstenregionen rund um den Erdball.



Wie jeder andere Fluss verändert auch der Mississippi ständig seinen Lauf. Indem der Fluss jährlich bei Hochwasser gewaltige Sedimentmengen ablagerte, sind innerhalb der letzten 4600 Jahre an seiner Mündung vier verschiedene Deltas entstanden.



Durch immer mehr Deichbauten beschleunigt sich der Landverlust. Deiche folgen dem Fluss vom Norden Louisianas bis zum Golf von Mexiko und trennen die umliegenden Marschen vom Sedimentnachschub. Zwischen 1932 und 1980 verlor das Delta mehr als 2500 Quadratkilometer Land.



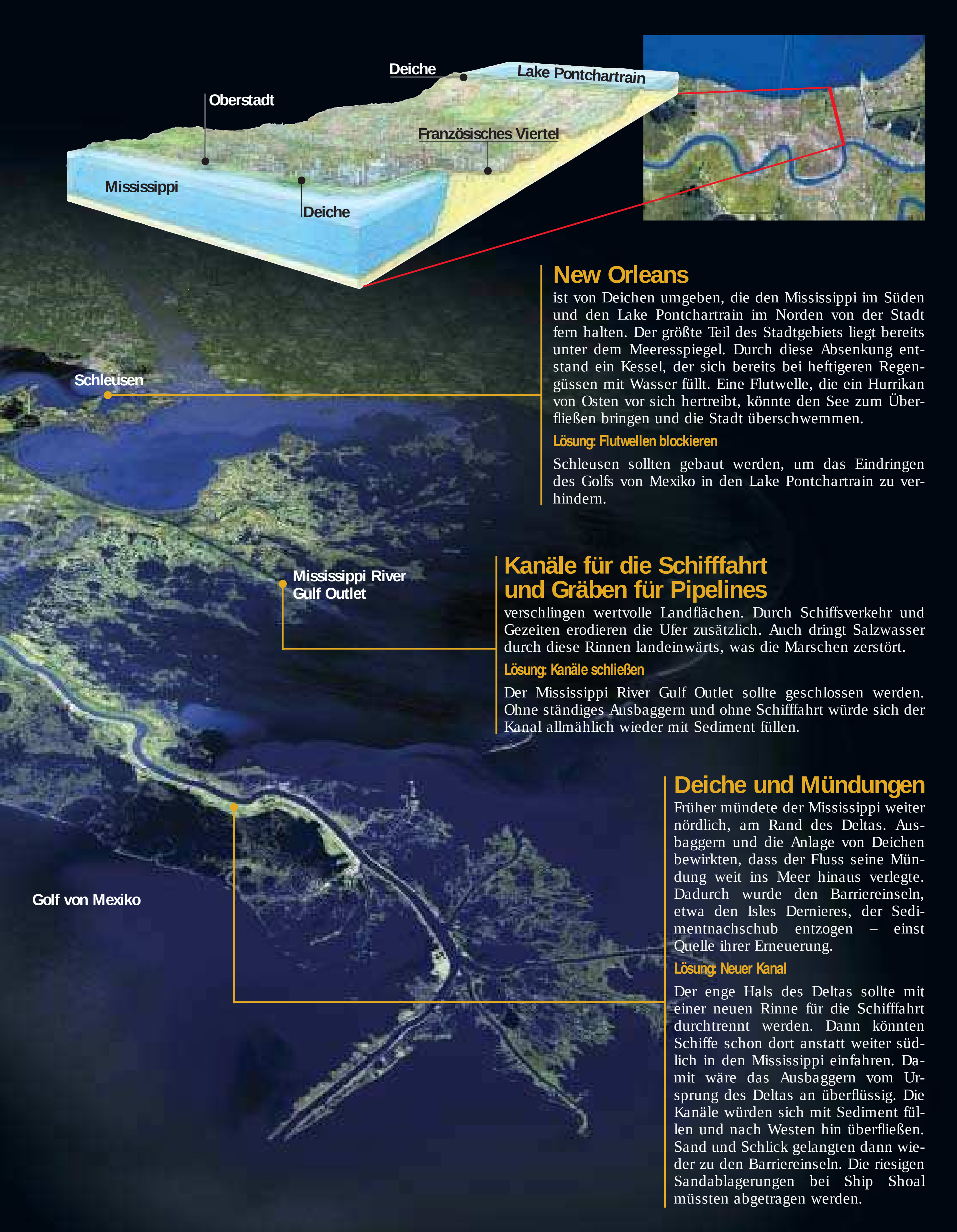
Deiche

verhindern, dass der Fluss bei Hochwasser Sedimente und Süßwasser über die Marschen verteilt. Ohne diesen Nachschub senken sich die Marschen ab und erodieren. Meerwasser dringt ins Landesinnere ein. Dadurch erhöht sich in der Marsch der Salzgehalt des Wassers. Bäume und Gräser, die normalerweise die Erosion verhindern würden, sterben ab.

Lösung: Marschen regenerieren

Durchstiche sollten an mehreren Stellen am Südufer des Flusses geschaffen werden. Kontrollschleusen sollten gebaut werden, die Süßwasser und Sediment durchlassen, damit diese über die Marschen hinweg zum Golf von Mexiko abfließen können.

GRAFIK: BRYAN CHRISTIE, QUELLE: L.S.U. (GROSSE KARTE), DON FOLEY (KLEINE KARTEN), QUELLEN: L.S.U. (UNTEN) UND U.S. ARMY CORPS OF ENGENEERS (MITTE); NATIONAL GEOGRAPHIC BOOK DIVISION (PERSPEKTIVISCHER QUERSCHNITT NEW ORLEANS), QUELLE: L.S.U. (KARTENAUSSCHNITT)



New Orleans

ist von Deichen umgeben, die den Mississippi im Süden und den Lake Pontchartrain im Norden von der Stadt fern halten. Der größte Teil des Stadtgebiets liegt bereits unter dem Meeresspiegel. Durch diese Absenkung entstand ein Kessel, der sich bereits bei heftigeren Regengüssen mit Wasser füllt. Eine Flutwelle, die ein Hurrikan von Osten vor sich hertreibt, könnte den See zum Überfließen bringen und die Stadt überschwemmen.

Lösung: Flutwellen blockieren

Schleusen sollten gebaut werden, um das Eindringen des Golfs von Mexiko in den Lake Pontchartrain zu verhindern.

Kanäle für die Schifffahrt und Gräben für Pipelines

verschlingen wertvolle Landflächen. Durch Schiffsverkehr und Gezeiten erodieren die Ufer zusätzlich. Auch dringt Salzwasser durch diese Rinnen landeinwärts, was die Marschen zerstört.

Lösung: Kanäle schließen

Der Mississippi River Gulf Outlet sollte geschlossen werden. Ohne ständiges Ausbaggern und ohne Schifffahrt würde sich der Kanal allmählich wieder mit Sediment füllen.

Deiche und Mündungen

Früher mündete der Mississippi weiter nördlich, am Rand des Deltas. Ausbaggern und die Anlage von Deichen bewirkten, dass der Fluss seine Mündung weit ins Meer hinaus verlegte. Dadurch wurde den Barriereinseln, etwa den Isles Dernieres, der Sedimentnachschub entzogen – einst Quelle ihrer Erneuerung.

Lösung: Neuer Kanal

Der enge Hals des Deltas sollte mit einer neuen Rinne für die Schifffahrt durchtrennt werden. Dann könnten Schiffe schon dort anstatt weiter südlich in den Mississippi einfahren. Damit wäre das Ausbaggern vom Ursprung des Deltas an überflüssig. Die Kanäle würden sich mit Sediment füllen und nach Westen hin überfließen. Sand und Schlick gelangten dann wieder zu den Barriereinseln. Die riesigen Sandablagerungen bei Ship Shoal müssten abgetragen werden.

Stadt. Daher mussten an den Kanalmündungen Pumpstationen errichtet werden, um das gesammelte Abwasser in den höher gelegenen See zu befördern.

Die Pumpen erfüllen noch einen anderen wichtigen Zweck. Da es sich bei den Abwasserkanälen vorwiegend um einfache Erdgräben handelt, sickert aus nassen Böden Grundwasser in sie ein. Sind sie schon vollgelaufen, können sie während eines Unwetters kein zusätzliches Wasser mehr aufnehmen. Also lässt die Stadt ständig die Pumpen laufen, um Sickerwasser aus den Kanälen zu entfernen. Dadurch wird dem Boden nun aber noch mehr Wasser entzogen, was Austrocknung und Absenkung weiter beschleunigt. „Wir verschlimmern unser eigenes Problem“, sagt Mugnier.

In der Tat gräbt das Korps immer mehr Kanäle und verstärkt die Pumpstationen. Ein Teufelskreis: Je mehr sich die Stadt absenkt, desto stärker wird sie überflutet, umso mehr muss gepumpt werden. Schon bekommen Straßen, Einfahrten und Hinterhöfe Risse. Wenn Erdgasleitungen platzen, fliegen Häuser in die Luft. Mugnier sorgt sich auch um die Nachbargemeinden von New Orleans. Auch sie graben immer mehr Drainagekanäle, denn ihre Bevölkerung wächst. Im westlich der Stadt gelegenen St. Charles Parish, sagt Mugnier, „könnte sich der Boden um mehr als vier Meter absenken.“

Das Versinken der Stadt ist kaum aufzuhalten

Menschen können die Absenkung des Deltas nicht stoppen, denn die Region ist durch Siedlungen zu sehr erschlossen. So können sie nicht einfach Deiche abreißen, damit der Fluss wieder mäandrieren und bei Hochwasser über die Ufer treten könnte. Die meisten Wissenschaftler und Ingenieure sind sich einig, dass nur zwei realistische Möglichkeiten existieren: Man muss die riesigen Marschen wiederherstellen, die das Hochwasser absorbieren können; und man muss die Barriereinseln wieder miteinander verbinden, um Flutwellen zu stoppen und die regenerierten Marschen vor Meer und Salzwasser zu schützen.

Seit Ende der 1980er Jahre haben die Senatoren von Louisiana dem Kongress verschiedene Pläne vorgelegt, um Unterstützung für einschneidende Hilfsmaßnahmen zu bekommen. Doch sie sprachen nicht mit einer Stimme. Die LSU hatte andere Flutmodelle als das Korps. Trotz einer generellen Übereinstimmung gab es einen Wettstreit darum, wessen Projekt wirksamer sein würde. Das Korps stellte die Katastrophenszenarien der Universität manchmal als verschleiertes Buhlen um Forschungsgelder hin. Zuweilen erwiderte die Universität in scharfem Ton: Für das Korps gebe es nur die unwissenschaftliche Lösung, nämlich noch mehr Baggern und Beton gießen. Derweil klagten Austern- und Krabbenfischer, daß die Vorschläge sowohl der Wissenschaftler als auch der Ingenieure ihre Fischgründe ruinieren würden.

Danny und Toby Duet leben auf einem Hausboot, das eine Meile vor der Küste ankert. Vor 16 Jahren war diese Gegend noch sumpfiges Land, dicht mit Marschgräsern bewachsen.

Len Bahr, Leiter des Büros für Küstenaktivitäten des Gouverneurs von Louisiana in Baton Rouge, versuchte die Streithähne zusammenzubringen. „Bezüglich der Vorgänge in den Feuchtgebieten sind fünf Bundesbehörden und sechs Staatsbehörden mit Hoheitsbefugnissen ausgestattet.“ Während der 1990er Jahre, bedauert Bahr, „erhielten wir vom Kongress jährlich nur vierzig Millionen Dollar“ – ein Tropfen auf den heißen Stein. Immerhin wurden mit diesem Geld kleinere Forschungsprojekte realisiert. Mit deren Ergebnissen konnten die Wissenschaftler etwa voraussagen, dass die Küste von Louisiana bis zum Jahr 2050 weitere 2500 Quadratkilometer, also eine Fläche von 50 x 50 Kilometern, an Marschland und Sumpfgebieten verlieren wird.

Im September 1998 schließlich kam Hurrikan Georges. Seine heftig wirbelnden Winde trieben eine fünf Meter hohe Wasserwand vor sich her, gekrönt von schnell rollenden Wellen. Diese Wassermassen drohten den Lake Pontchartrain zu fluten und bis nach New Orleans vorzudringen. Das war exakt die Katastrophe, vor der die LSU schon nach ihren ersten Modellrechnungen gewarnt hatte. Das Schicksal hatte noch einmal ein Erbarmen. Kurz bevor er die Küste erreichte, verlangsamte sich „Georges“ und drehte um winzige zwei Grad nach Osten ab. Dieser Effekt brachte die Rettung: Unter den plötzlich aus verschiedensten Richtungen wehenden Winden brach die Flutwelle zusammen.

Erst damit wurde den streitenden Wissenschaftlern, Ingenieuren und Politikern aber bewusst, wie knapp das ganze Mississippi-Delta einer Katastrophe entronnen war. Aus der Furcht erwuchs schließlich ein Konsens, berichtet Bahr. Ende 1998 wurde „Coast 2050“ (Küste 2050) veröffentlicht, ein Plan zur Regenerierung der Küstenlandschaft Louisianas. Daran beteiligt waren das Büro des Gouverneurs, das Bundesministerium für natürliche Ressourcen, das Ingenieurkorps der US-Armee, die Umweltschutzbehörde, der Dienst für Fischerei und Jagd sowie alle zwanzig Küstenanrainergemeinden des Bundesstaates.

Für keine dieser Gruppen ist jedoch der Plan bisher verbindlich. Bei Verwirklichung aller vorgeschlagenen Projekte würden Kosten von ca. 14 Milliarden Dollar anfallen. „Dann geben Sie mir“, bitte ich, „doch die Liste der vielversprechendsten Projekte von Coast 2050“.

Wir sitzen in Baton Rouge im 9. Stock neben dem Büro des Gouverneurs, mir gegenüber Joe Suhayda, Direktor des Forschungsinstituts für Wasserressour-

cen der LSU. Mit dem Computer hat er zahlreiche Wege durchgerechnet, auf denen Sturmfluten durch die Gegend ziehen könnten. Er kennt alle wichtigen Wissenschaftler, Armeekorps-Ingenieure und Katastrophenschützer von New Orleans. Neben ihm sitzt Vibhas Aravamuthan, der die Computermodelle der LSU programmiert, Len Bahr und dessen Stellvertreter, Paul Kemp. Sie alle wirkten an der Erstellung von „Coast 2050“ mit.

Zerstörte Austernbänke

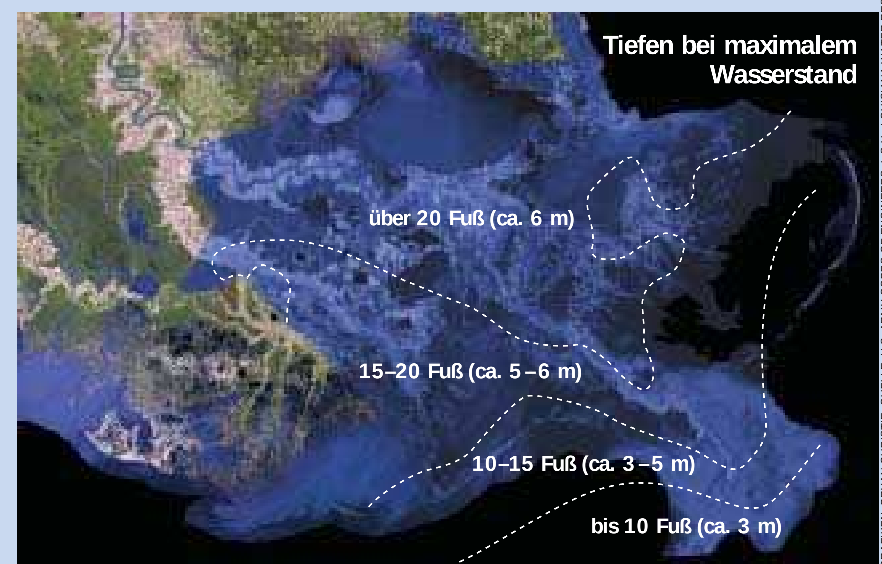
Zuallererst, darin sind sich die Forscher einig, muss das verschwindende Marschland regeneriert werden. Dazu sind entlang des Mississippis Überlaufkanäle zu schaffen. An ausgewählten Stellen am Südufer des Flusses soll das Korps jeweils einen Durchstich im Deich anlegen und eine Kontrollschleuse bauen. Süßwasser und darin schwebende Sedimente sollen dann über diese Durchstiche durch bestimmte Marschen in Richtung Golf abfließen können. Ja, möglicherweise würden Austernbänke durch dieses Wasser zerstört. Bei sorgfältiger Führung der Überlaufkanäle könnte man sich jedoch mit den Landbesitzern einigen.

In einer zweiten Phase sollen die Barriereinseln vor der Küste wieder aufgebaut werden. Dazu wäre es sinnvoll, die nahe gelegene Ship-Sandbank zu nutzen, aus der mehr als 500 Millionen Kubikmeter Sand gewonnen werden könnten. Anschließend soll das Korps auf halbem Weg zur Küste einen Kanal in den schmalen Hals des Deltas graben. Durch ihn hindurch könnten Schiffe in den Fluss gelangen. Das würde die Fahrt zu Häfen im Landesinneren verkürzen und Kosten sparen. Der südliche Flussabschnitt bräuchte dann nicht mehr ausgebaggert zu werden. Somit würde sich die Mündung mit Sediment auffüllen und der Fluss nach Westen überfließen. Sand und Schlick könnten aus ihm wieder in die küstenparallelen Strömungen gelangen. Diesem wiederum verdanken die Barriereinseln ihre Existenz.

Der geplante Kanalbau ließe sich in ein größeres staatliches Projekt einbinden. Es sieht vor, einen komplett neuen Hafen mit größerer Tiefe zu errichten („Millennium Port“). Damit wäre er für moderne Containerschiffe besser geeignet als der Hafen von New Orleans mit seinem wichtigsten Zugangskanal, dem Mississippi River Gulf Outlet (MRGO, auch „Mr. Go“ ausgesprochen). Letzteren hatte das Korps Anfang der 1960er Jahre angelegt. Der Durchstich ist seither gewaltig erodiert.

Die Katastrophe: das schlimmstmögliche Szenario





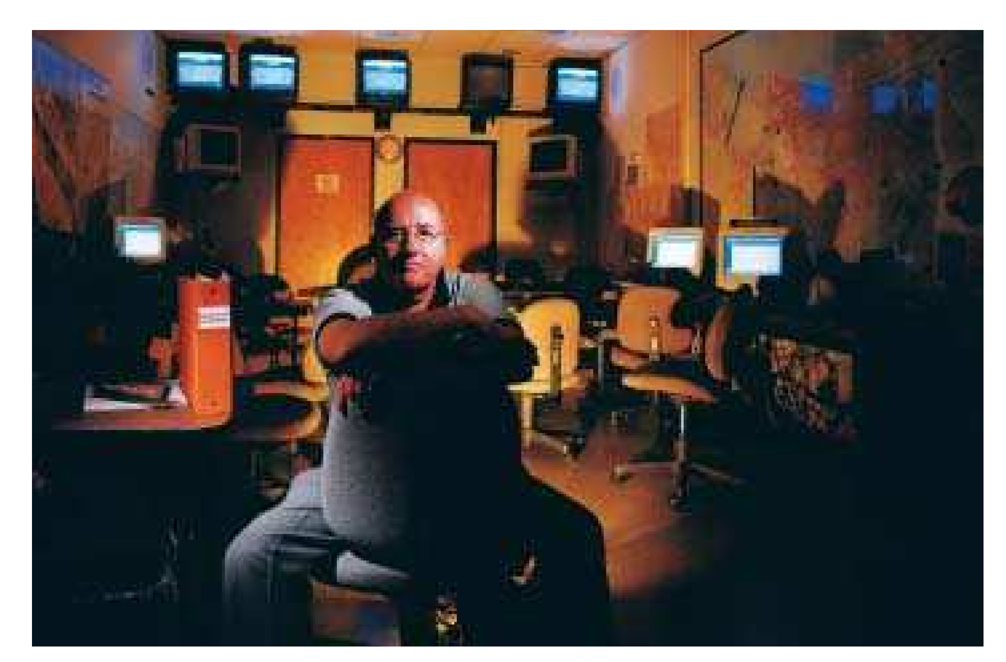
GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE; QUELLE: U.S. ARMY COPRS OF ENGINEERS; L.S.U.; LOUISIANA WATER RESOURCES RESEARCH INSTITUTE

Wissenschaftler der Louisiana State University prophezeien anhand von Computermodellen das Unheil: Ein gegen den Uhrzeigersinn rotierender Hurrikan der Stärke 4 würde beim Überqueren des Golfs vom Südwesten her eine Flutwelle fast fünfzig Kilometer landeinwärts treiben. (Ein Wirbelsturm der Stärke 4 ist definiert durch Winde von bis zu 250 Stundenkilometern mit Flutwellen.) Die Fluten würden damit fast bis New Orleans vordringen, sodann in den Lake Pontchartrain einfließen, am Westufer überlaufen und sich zuletzt in die Stadt ergießen.

Auf dem Höhepunkt der Überschwemmung stünde die Unterstadt mehr als sechs Meter tief unter Wasser – 33 Stunden, nachdem der Sturm erstmals die Küste erreicht hätte.

Ursprünglich war er rund 150 Meter breit, heute erreicht er an einigen Stellen sogar bis zu 600 Meter Breite. Unablässig gelangt durch ihn Salzwasser ins Landesinnere. Dieses hat schon einen Großteil der Marsch vernichtet, die einst New Orleans nach Osten vor den Golfstürmen schützte. Falls der neue Kanal oder der Millennium Port gebaut würden, könnte das Korps den MRGO dicht machen.

Verbleibende Schwachstellen beim Schutz des Deltas sind zwei schmale Wasserwege am Ostrand des Lake Pontchartrain, die diesen mit dem Golf verbinden. Am besten wäre es, diese durch Deiche abzuriegeln – ähnlich wie in den Niederlanden, wo die Nordsee ▶



Walter Maestri, Leiter des Katastrophenschutzes des Jefferson Parish, sitzt am Stadtrand von New Orleans in einem hochwassersicheren, unterirdischen Kommandobunker: „Ich will nicht einmal daran denken, welche Katastrophen ein schwerer Hurrikan hier verursachen könnte.“

durch Deiche am Eindringen ins Landesinnere gehindert wird. Doch diese Ausweg scheint politisch nicht durchsetzbar. „Wir haben diese Lösung schon vorgeschlagen, leider wurde sie abgelehnt“, berichtet Bahr. Die Kosten des Projekts wären exorbitant.

Bei den Projekten von „Coast 2050“ handelt es sich bisher eher um die Vision einer kleinen Gruppe von Wissenschaftlern als um konkrete Planungswirklichkeit. Doch eine Reihe renommierter Experten unterstützt sie. Der Geologe Ivor van Heerden ist Stellvertretender Direktor am Hurrikan-Zentrum der LSU. Auch er ist der Ansicht, „dass wir, falls wir Erfolg haben wollen, die Natur nachahmen müssen. Durch den Bau von Überlaufkanälen und die Wiederherstellung von Sedimentströmen zu den Barriereinseln kommen wir dem natürlichen Zustand schon ziemlich nahe.“

Shea Penland ist ebenfalls dieser Ansicht. Der Geologe warnt aber, der Mississippi könne möglicherweise nicht genug Sedimente nachliefern, um eine größere Zahl solcher Überlaufkanäle zu bedienen. Analysen von Robert Meade vom US-Geological Survey zeigen, dass sich gegenüber 1953 der Nachschub an Schwebstoffen inzwischen mehr als halbiert hat. Sie werden großenteils von Staudämmen aufgefangen, die entlang des Flusslaufes quer durch das Innere der USA errichtet wurden.

Aus Sicht des Korps sollten alle Projekte von „Coast 2050“ verwirklicht werden. Zunächst wird der Davis-Pond-Überlaufkanal gebaut. Projektmanager Al Naomi, ein junger Korps-Ingenieur, sowie der Ozeanbiologe Bruce Baird nehmen mich mit zur Baustelle am Süddeich des Mississippi. Sie liegt dreißig Kilometer westlich von New Orleans. Die Anlage wirkt wie ein mittelgroßer Staudamm, der in den Deich integriert wurde. In der Mitte befinden sich Stahltore, jedes groß genug, um mit einem Bus durchzufahren.

Rettung für Fischgründe

Je nach Flutstand werden sich die Tore öffnen oder schließen, um nur eine bestimmte Menge Wasser hindurchzulassen. Der Überlaufkanal mündet in einem Sumpfland, das sich etwa 1,5 Kilometer Richtung Süden erstreckt. Es wurde eigens gerodet, damit sich dort ein flaches Flussbett bilden kann, das sich allmählich in der weitläufigen Marsch verliert. Durch den Überlauf werden pro Sekunde bis zu 350 Kubikmeter Wasser aus dem Mississippi abgeleitet.

Der amerikanische Urstrom transportiert bei New Orleans pro Sekunde Wassermengen zwischen 6500 Kubikmeter in Trockenperioden bis zu 30 000 Kubikmeter bei Hochwasser. Es wird erwartet, dass durch den Überlaufkanal über achttausend Hektar Feuchtgebiete, Austernbänke und Fischgründe gerettet werden können.

Ungeduldig wartet das Korps auf die Inbetriebnahme des Davis-Pond-Kanals, denn es kann bereits auf einen Erfolg in Caernarvon, in der Nähe des MRGO, zurückblicken. Dort wurde 1991 eine kleinere, experimentelle Schleuse in Betrieb genommen. Bald lagerten sich in der Marsch mehr Sedimente ab, und durch die Zufuhr von Süßwasser sank ihr Salzgehalt. Dank des Caernarvon-Überlaufkanals regenerierten sich bis 1995 über hundert Hektar Land.

Falls in New Orleans in den nächsten Jahren keines der geplanten Vorhaben realisiert wird, werden langfristig eine Million Menschen die Umgebung der Stadt verlassen müssen. Eine weitere Million Menschen würden in der Stadt am Boden eines sinkenden Kessels leben, umgeben von immer höher wachsenden Deichen. Die Bewohner wären in einer kranken Stadt gefangen, die nur überleben kann, wenn das Wasser ununterbrochen abgepumpt wird.

Mit neuen Techniken, die in New Orleans zum Einsatz kämen, könnten womöglich auch bedrohte Feuchtgebiete in den Mündungsdeltas anderer großer Flüsse der Erde gerettet werden. Regierungen könnten daraus lernen, wie der Schaden, den ein steigender Meeresspiegel verursacht, zu begrenzen ist. Dies gilt auch für schwere Unwetter, wie sie als Folge von Klimaveränderung verstärkt auftreten sollen.

Walter Maestri wird bei dieser Aussicht mulmig. Der erste tropische Wirbelsturm der Hurrikan-Saison 2001 hieß Allison. Als dieser im letzten Juni eine ganze Woche lang täglich hundert Millimeter Niederschlag auf New Orleans abregnete, brachte er das Pumpsystem beinahe zum Erliegen. Maestri verbrachte seine Nächte in einem hochwassersicheren, unterirdischen Kommandobunker. Von dort aus koordinierte er Polizei, Katastrophenschutz, Feuerwehr und Nationalgarde.

Es handelte sich lediglich um Regen, doch schon dieser stellte für die Teams eine hohe Belastung dar. „Jegliche Wassermenge von einiger Bedeutung, die in diese Stadt eindringt, wird zur Bedrohung“, sagt Maestri. „Obwohl ich für genau diesen Fall planen muss, will ich nicht einmal daran denken, welche Katastrophen ein schwerer Hurrikan hier anrichten könnte.“ ■

Mark Fischetti *ist freier Wissenschaftsjournalist in den USA.*

Literaturhinweise

Holding Back the Sea: The Struggle for America's Natural Legacy on the Gulf Coast. Von Christopher Hallowell. HarperCollins, 2001.

Transforming New Orleans and Its Environs: Centuries of Change. Von Craig E. Colten (Hg.). University of Pittsburgh Press, 2001.

Weblinks zum Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft“.*



Gibt es ein unsicht



Ökologen warnen vor einem massenhaften Artensterben, doch selbst manche Biologen zweifeln an den Katastrophen-Szenarien, während Naturschützer das Problem durch die Fixierung auf medienwirksame Wirbeltiere eher verschleiern als lösen helfen. Tatsächlich ist es äußerst schwierig, das ganze Ausmaß des Artenschwunds zu ermitteln, den Schaden konkret zu beziffern und wirksam Abhilfe zu schaffen.

Von W. Wayt Gibbs

Unter den Wissenschaftlern, die sich letzten August zur Jahrestagung der Society for Conservation Biology in der Stadt Hilo auf Hawaii versammelt hatten, war die Verzweiflung mit Händen zu greifen. „Ich bin bloß froh, dass ich bald in Pension gehe und nicht mehr sehen muss, wie alles verschwindet“, klagte P. Dee Boersma, der frühere Präsident der Gesellschaft, während des Abendessens am Eröffnungstag. Andere Veteranen der Feldforschung rund um den Tisch pflichteten ihm mit düsterem Gemurmel bei.

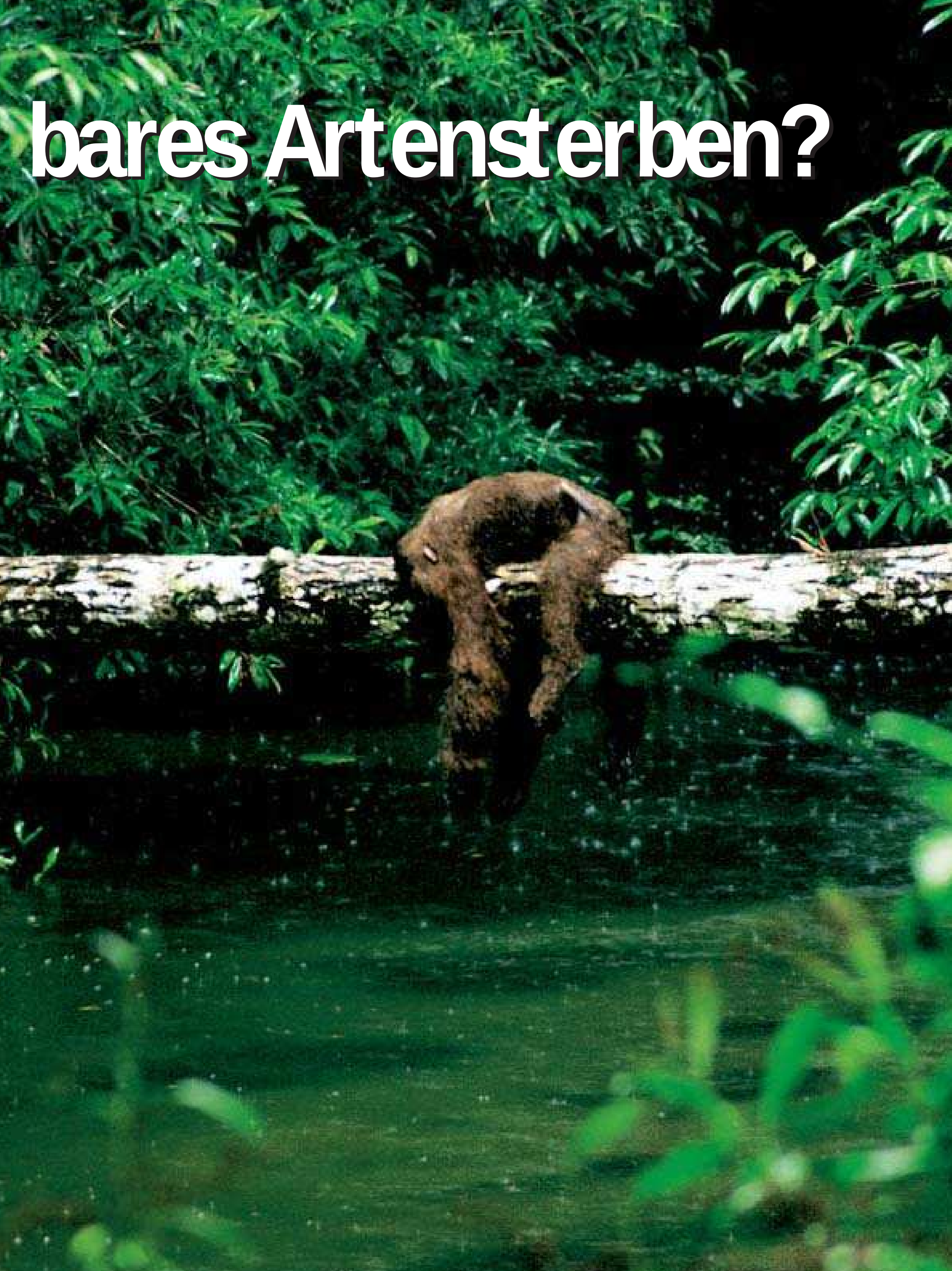
Bei seiner Eröffnungsrede am nächsten Morgen setzte Robert M. May alles daran, eventuell verbliebenen Optimisten auch die letzten Reste von Zuversicht zu nehmen. Der Zoologe von der Universität Oxford ist Präsident der Royal Society und war bis zum Jahr 2000 oberster wissenschaftlicher Berater der britischen Regierung. Nach seinen neuesten groben Schätzungen hat die Aussterberate – die Geschwindigkeit, mit der biologische Arten von unserem Planeten verschwinden – im Laufe des 20. Jahrhunderts etwa tausendmal höhere Werte erreicht, als sie vor dem Auftreten der Menschheit hatte. Verschiedene Überlegungen, erklärte er, „legen nahe, dass sie in den nächsten hundert Jahren noch einmal um etwa den Faktor zehn steigt ... Und das brächte uns direkt an den Rand der sechsten großen Extinktionswelle in der Geschichte des irdischen Lebens.“

Doch sparte May auch nicht mit Kritik an der eigenen Zunft. Er warf Biologen und Umweltschützern einen „absoluten Wirbeltierchauvinismus“ vor. Ihre einseitige Ausrichtung auf Säuger, Vögel und Fische untergrabe alle Bemühungen, Ausmaß und Folgen des tatsächlichen Verlusts an biologischer Vielfalt zuverlässig vorherzusagen – schließlich sei der Großteil der Biodiversität anderswo zu finden. Dies stelle auch den Sinn der Konzentration auf „Hotspots“ in Frage: Schwerpunkt-Regionen, in denen angeblich besonders viele Tier- und Pflanzenarten vorkommen, deren Lebensraum stark bedroht ist.

„Und zu guter Letzt müssen wir uns die Frage gefallen lassen, warum wir uns überhaupt“ um den Artenreichtum dieses Planeten und sein Schwinden „kümmern“, stellte May fest. „Diese zentrale Frage ist politischer Natur und betrifft unsere gesellschaftlichen Werte. Bei ihrer Beantwortung hat die Stimme der mit Naturschutz befassten Wissenschaftler keinen besonderen Stellenwert.“ Leider, so schloss er „ist keines der ... Argumente, mit denen wir die Politiker von der ▶

Der Tod eines Orang-Utans berührt uns und scheint die schlimmsten Befürchtungen über den Rückgang der biologischen Vielfalt zu bestätigen. Aber verstellt diese Fixierung auf Sympathie weckende Tierarten nicht den Blick für die eigentliche Tragödie? Der Affe auf diesem Foto starb eines natürlichen Todes. Und ein sehr viel größerer Teil des evolutionären Erbes der Erde, als dort auf dem Baumstamm liegt, befindet sich im oder am Wasser und ist stärker bedroht.

CHERYL D. KNOFF


bares Artensterben?

Wichtigkeit unseres Anliegens zu überzeugen suchen ... wirklich zwingend.“

Mays Behauptung, dass die Menschheit offenbar ein Artensterben verursacht, das schlimmer als alles ist, was sich seit dem Untergang der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren ereignet hat, mag jene schockieren, die sich mit dem Thema Biodiversität nicht weiter beschäftigt haben. Aber Naturschützern entlockt sie keine entsetzten Reaktionen mehr. Sie haben sie in vielerlei Variationen schon seit mindestens 1979 gehört, als Norman Myers, der Begründer des Hotspot-Ansatzes in seinem Buch „The Sinking Ark“ („Die sinkende Arche“) schätzte, dass jedes Jahr 40000 Arten ihren letzten Vertreter verlören und bis zum Jahr 2000 eine Million Arten ausgestorben wären. Eine ähnliche Prognose machte in den 1980er Jahren Thomas E. Lovejoy. Demnach sollten 15 bis 20 Prozent der Arten bis zum Ende des 20. Jahrhunderts ausgelöscht worden sein. Paul R. Ehrlich von der Universität Stanford (Kalifornien) kam bei seinen Berechnungen sogar auf 50 Prozent. „Ich bin einigermaßen sicher, dass [die Auslöschung eines Fünftels oder gar der Hälfte der Arten] nicht stattgefunden hat“, sagt jedoch Kirk O. Winemiller, ein Fischkundler von der Texas A&M University in College Station, der gerade einen Übersichtsartikel über die wissenschaftliche Literatur zu Aussterberaten fertig gestellt hat.

Tatsächlich liefern neuere Extrapolationen etwas geringere Werte, denn einige bedrohte Arten haben länger überdauert als erwartet. Andere sind sogar von den Toten auferstanden. Dazu zählt etwa das einzige Säugetier Kontinentaleuropas, das als ausgestorben galt: die Bayerische Kurzohrmaus *(Microtus bavaricus)*. Angeblich war sie schon seit rund 500 Jahren ausgerottet. „Erst diesen Sommer entdeckte man, dass [sie] in Wahrheit noch unter uns weilt“, berichtet Ross D. E. MacPhee, Kurator für Säugetierkunde am American Museum of Natural History (AMNH) in New York.

Gemetzel ...

Dennoch: In der 1999er Auflage seines viel gelesenen Buchs „Des Lebens ganze Fülle“ (Claassen-Verlag) zitiert Edward Osborne Wilson von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) aktuelle Schätzungen, wonach zwischen ein und zehn Prozent der Arten in jeder Dekade für immer verloren gingen. Das wären mindestens 27000 Spezies im Jahr. Michael L. Novaceck, wissenschaftlicher Leiter des AMNH, schrieb vor knapp einem Jahr in einem Übersichtsartikel, dass „Angaben über eine Vernichtung von bis zu 30 Prozent aller Arten bis Mitte des 21. Jahrhunderts nicht unrealistisch sind.“ Und in einer Umfrage unter Biologen, die 1998 stattfand, äußerten 70 Prozent die Ansicht, dass sich momentan eine Massenextinktion ereignet; ein Drittel erwartete einen Verlust von 20 bis 50 Prozent der Arten in den nächsten 30 Jahren.

Solche Zahlen erklärt Bjørn Lomborg, Professor für Statistik und politische Wissenschaften an der Universität Århus, in seinem kürzlich erschienenen Buch „The Sceptical Environmentalist“ für stark übertrieben. „Auch wenn allenthalben behauptet wird, es gäbe einen massenhaften Artenschwund, so deckt sich das einfach nicht mit den vorliegenden Daten,“ schreibt er. Den Umweltschützern wirft er unter anderem vor, sie hätten neue Hinweise ignoriert, wonach die Entwaldung in den Tropen nicht so große Opfer fordert wie befürchtet. „Keine gut untersuchte Tiergruppe weist ein Artenschwund-Muster auf, das zu stark gestiegenen Extinktionsraten passen würde“, sekundiert MacPhee. Laut Lomborg prognostizieren die besten Modellrechnungen eine Aussterberate von 0,15 Prozent der Arten pro Dekade: „keine Katastrophe, sondern ein Problem – eines von vielen, das die Menschheit zu lösen hat.“

Zur Beantwortung der Frage, ob denn nun eine Massenextinktion stattfindet oder droht, muss man drei Größen kennen: die natürliche (oder „Hintergrund-“) Aussterberate, die aktuelle Geschwindigkeit des Artenverlustes und ihre mögliche Änderung in der Zukunft. Der erste Schritt besteht laut Wilson in der Berechnung der mittleren Lebensspanne einer Spezies anhand von Fossilfunden. „Die Hintergrund-Aussterberate ist dann der Kehrwert davon. Wenn Arten nach einem Zufallsmuster entstehen und alle exakt eine Million Jahre lang existieren ..., dann heißt das, dass jedes Jahr pro Million Arten eine auf natürliche Weise zu Grunde geht.“

... oder langsamer Rückgang?

Auch May berechnete in einem Artikel von 1995, der immer noch in fast allen Veröffentlichungen über dieses Thema zitiert wird (sogar in Lomborgs Buch), das Hintergrundsterben auf ähnliche Weise. Dabei stützte er sich allerdings auf Schätzungen, die für die mittlere Lebensspanne einer Art fünf bis zehn Millionen Jahre veranschlagten. Deshalb erhielt er eine Rate, die fünf- bis zehnmal niedriger liegt als im obigen Beispiel von Wilson. Aber nach Meinung des Paläontologen David M. Raup von der Universität Chicago (inzwischen emeritiert), der einige der von May und Wilson benutzten Zahlen veröffentlicht hatte, gehen solche Berechnungen von drei falschen Voraussetzungen aus.

Die erste ist, dass alle Arten von Pflanzen, Säugetieren, Insekten, wirbellosen Meerestieren und anderen Gruppen in etwa gleich lange existieren. In Wirklichkeit variiert die typische Überlebenszeit von Gruppe zu Gruppe um den Faktor zehn oder mehr, wobei Säugerarten zu den am wenigsten ausdauernden gehören. Zweitens wird irrigerweise unterstellt, dass alle Organismen in etwa die gleiche Chance haben, zur fossilen Überlieferung beizutragen. Aber nach Schätzungen der Paläontologen haben weniger als vier Prozent aller Arten, die jemals existierten, überhaupt Spuren hinterlassen. „Was wir an Fossilien finden, stammt von weit verbreiteten, erfolgreichen Arten“, meint Raup. Und John Al-

STECKBRIEF

➤ Warnungen namhafter Ökologen zufolge verursacht die Menschheit ein Artensterben, wie es die Erde seit dem Untergang der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren nicht mehr gesehen hat. Aber Paläontologen und Statistiker ziehen die Prognosen in Zweifel.

➤ Es ist schwer zu ermitteln, wie schnell derzeit Arten verschwinden. Modelle, die auf der Geschwindigkeit der Entwaldung in den Tropen oder auf dem Wachstum der roten Listen basieren, sagen steigende Extinktionsraten voraus. Aber die einseitige Fokussierung auf Pflanzen und Wirbeltiere, die nur eine Minderheit unter den vielzelligen Lebewesen darstellen, relativiert solche Vorhersagen. Weil 90 Prozent aller Arten noch keinen Namen haben, geschweige denn gezählt wurden, ist ihre Gefährdung unmöglich zu überprüfen.

➤ Angesichts der Unsicherheit über den Rückgang der biologischen Vielfalt und deren ökonomischen Wert debattieren Wissenschaftler darüber, ob seltene Arten im Mittelpunkt der Naturschutzbemühungen stehen sollten. Andere schlagen vor, lieber relativ unberührtes – und billiges – Land zu retten. Hier könne die Evolution unbeeinflusst vom Menschen weitergehen.

Massensterben einst – und jetzt?

Die fünf großen Katastrophen für das irdische Leben

Wie die überlieferten Fossilien belegen, gab es in der Erdgeschichte fünf verheerende Artensterben. Sie wirkten sich jeweils besonders schlimm auf die Meeresfauna aus. Zeitpunkt, Dauer, Ausmaß und mutmaßliche Ursachen dieser Katastrophen sind hier zusammengestellt.

TRILOBIT: LESTER V. BERGMAN / CORBIS; PANZERGANOID: JAMES L. AMOS / CORBIS; RUNZELKORALLE UND PHYTOSAURIERZAHN: RICHARD PASELK, HUMBOLDT STATE UNIVERSITY / NATURAL HISTORY MUSEUM; MOSASAURIER: MIKE EVERHART, OCEANS OF KANSAS PALEONTOLOGY



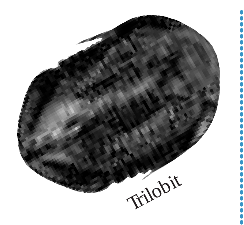
Ende des Ordoviziums

Dauer: **10 Millionen Jahre**

Beobachtete Extinktionsrate mariner Gattungen: **60%**

Berechnete Extinktionsrate mariner Arten: **85%**

Vermutete Ursache: dramatische Schwankungen des Meeresspiegels



Trilobit

Panzerganoid (Fisch)

Spätes Devon

Dauer: < **3 Millionen Jahre**

Beobachtete Extinktionsrate mariner Gattungen: **57%**

Berechnete Extinktionsrate mariner Arten: **83%**

Vermutete Ursachen: Meteoriteneinschlag; globale Abkühlung; Sauerstoffmangel in den Ozeanen

Ende des Perms

Dauer: **unbekannt**

Beobachtete Extinktionsrate mariner Gattungen: **82%**

Berechnete Extinktionsrate mariner Arten: **95%**

Vermutete Ursachen: dramatische Schwankungen des Klimas oder Meeresspiegels; Asteroiden- oder Kometeneinschlag; intensiver Vulkanismus



Runzelkoralle

Phytosaurierzahn

Ende der Trias

Dauer: **3 bis 4 Millionen Jahre**

Beobachtete Extinktionsrate mariner Gattungen: **53%**

Berechnete Extinktionsrate mariner Arten: **80%**

Vermutete Ursachen: intensiver Vulkanismus; globale Erwärmung

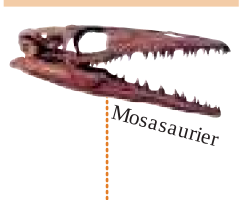
Ende der Kreide

Dauer: < **1 Million Jahre**

Beobachtete Extinktionsrate mariner Gattungen: **47%**

Berechnete Extinktionsrate mariner Arten: **76%**

Vermutete Ursachen: Meteoriteneinschlag; intensiver Vulkanismus



Mosasaurier

Millionen Jahre vor der Gegenwart

570	510	439	409	363	290	248	210	146	65	1,64
Kambrium	Ordovizium	Silur	Devon	Karbon	Perm	Trias	Jura	Kreide	Tertiär	Quartär

Opfer des Menschen

Da in den letzten 500 Jahren schon mehr als 1100 konkret benennbare Arten (acht davon in der Tabelle rechts) allem Anschein nach von der Erdoberfläche verschwunden sind, fürchten Ökologen, dass eine sechste Massenextinktion unmittelbar bevorsteht. Künftige Paläontologen, die in unsere Zeit zurückblicken, würden aber vermutlich nichts Ungewöhnliches an dem bisher aufgetretenen Artensterben finden.

Art (deutscher Name)	zuletzt beobachtet, Ort	Ursache des Aussterbens
Coregonus johannae (eine Maränenart)	1952, Huron- und Michigansee (USA)	Überfischung, Hybridisierung
Cyprinodon ceciliae (ein Zahnkärpfling)	1988, Ojo de Agua La Presa (Mexiko)	Verlust der Nahrungsgrundlage
Dobsonia chapmani (ein Flughund)	1970er, Zebuinseln (Philippinen)	Waldvernichtung, Jagd
Monachus tropicalis (karibische Mönchsrobbe)	1950er, Karibik	Jagd, Störung
Myiagra freycineti (Guam-Monarch)	1983, Guam	Verfolgung durch eingeführte braune Baumschlange
Moho braccatus (Schuppenkehl-Moho)	1987, Insel Kauai (Hawaii)	Krankheit, Verfolgung durch Ratten
Glaucopsyche xerces (kleiner Xerces-Bläuling)	1941, San-Francisco-Halbinsel (USA)	Landumwandlung
Hydropsyche tobiasi (Köcherfliegenart)	1950, Rhein	Städtische und Industrieabwässer

QUELLEN: COMMITTEE ON RECENTLY EXTINCT ORGANISMS; BIRDLIFE INTERNATIONAL; XERCES SOCIETY; WORLD WILDLIFE FUND

roy von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara ergänzt: „Die unbedeutenden Spezies, die auf irgendeinen Hügel oder eine Insel beschränkt blieben, sind alle ausgestorben, ohne sich in versteinerter Form zu verewigen."

Das dritte Problem ist, dass May und Wilson eine mittlere Lebensspanne berechneten. Stattdessen hätten sie den Medianwert verwenden sollen. Denn „die überwiegende Mehrheit der Arten ist kurzlebig", erklärt Raup. „Der Mittelwert wird also durch die ganz wenigen Spezies mit sehr langer Lebensspanne verzerrt." Diese drei methodischen Fehler führen alle zu einer Unterschätzung der Hintergrundrate – und lassen so die heutige Situation erschreckender erscheinen, als sie ist.

Aussterbefilter

Darwins „Survival of the Fittest" („Überleben der Tauglichsten") nimmt eine neue Bedeutung an, wenn Menschen eine Region erschließen. Von vier Gegenden mit mediterranem Klima haben diejenigen in jüngster Zeit einen größeren Anteil ihrer Gefäßpflanzenarten verloren, die noch nicht so lange erschlossen sind. Sobald durch „künstliche Selektion" jene Pflanzen herausgefiltert wurden, die sich am wenigsten mit der Landwirtschaft vertragen, scheinen die Aussterberaten zu sinken.

Region (geordnet nach Erschließungszeitpunkt)	ausgestorben (in Arten pro 1000)	gefährdet (in Prozent)
Mittelmeerraum	1,3	14,7
Kapregion Südafrikas	3,0	15,2
Kalifornien	4,0	10,2
Westaustralien	6,6	17,5

QUELLE: „EXTINCTIONS IN MEDITERRANEAN AREAS," WERNER GREUTER IN: EXTINCTION RATES. HERAUSGEGEBEN VON J. H. LAWTON UND R. H. MAY, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1995.

Grausige Ratespiele

Letztes Jahr unternahmen die Biomathematikerin Helen M. Regan von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und einige ihrer Kollegen einen ersten Versuch, solche systematischen Fehler zu korrigieren und Unsicherheiten in den Daten zu berücksichtigen. So betrachteten sie nur die Säugetiere als die am besten untersuchte Gruppe. Sie überschlugen, wie viele der heute lebenden und der jüngst ausgestorbenen Säuger dereinst in versteinerter Form wieder auftauchen würden. Außerdem rechneten sie die Unsicherheitsfaktoren mit ein, statt sich auf gemittelte Schätzungen zu verlassen. Am Ende kam heraus, dass „die momentane Aussterberate bei den Säugern 17- bis 377-mal so groß wie die Hintergrundrate ist". Die beste Schätzung wäre ein 36- bis 78-facher Anstieg in den letzten 400 Jahren.

Es gibt jedoch weitere Unsicherheiten. Die Internationale Naturschutzorganisation IUCN führt „rote Listen" von Arten, die in freier Wildbahn vermutlich ausgestorben sind. Doch MacPhee bemängelt, dass „die IUCN-Methode zur Ermittlung des Aussterbens nicht streng genug ist, um zuverlässig zu sein". Er und andere Experten auf dem Gebiet haben ein „Komitee für kürzlich ausgestorbene Organismen" gegründet. Sie durchkämmen die roten Listen nach Arten, die wirklich eigenständig und nicht bloße Subspezies, Rassen oder Populationen waren und die trotz angemessener Bemühungen nicht mehr aufgefunden werden konnten. Das Komitee bestätigte 60 der 87 in den IUCN-Listen geführten Säugerarten als ausgestorben. Aber von den 92 Arten von Süßwasserfischen, die laut IUCN nicht mehr existieren, hält es nur 33 für definitiv ausgelöscht.

Andererseits könnten einer jeden Spezies, die fälschlicherweise vermisst wird, hunderte oder gar tausende gegenüberstehen, die vom Erdball verschwinden, ohne dass die Wissenschaft je von ihnen erfahren hat. „Die Unsicherheit darüber, mit wie vielen Arten wir den Planeten teilen, ist so groß, dass die Angaben um den Faktor zehn schwanken", bekennt May. „Ich tippe auf etwa 7 Millionen, aber glaubwürdige Schätzungen reichen von 5 bis 15 Millionen", Mikroorganismen nicht eingerechnet.

Taxonomen haben bisher rund 1,8 Millionen Arten identifiziert, aber die Biologen wissen fast nichts über die meisten von ihnen. Am größten sind die Wissenslücken ausgerechnet bei den Lebewesen, die im Tierreich dominieren: Insekten, Fadenwürmern und Krebstieren. Etwa 40 Prozent der rund 400 000 bekannten Käferarten sind mit nur einer Fundstelle beschrieben – aber ohne eine Vorstellung vom Verbreitungsgebiet einer Spezies lässt sich deren Aussterben kaum definitiv feststellen. Sogar wirbellose Tiere, von denen man weiß, dass sie nicht mehr existieren, werden oft nicht verzeichnet: Als 1914 die Wandertaube ausstarb, riss sie zwei Arten parasitischer Läuse mit in den Tod; diese sind aber immer noch nicht in den Listen der IUCN aufgetaucht.

„Die Chance, das Aussterben einer Art zu beobachten, ist ungefähr so gering, wie mit eigenen Augen einen Flugzeugabsturz zu sehen", sagt Wilson. Nicht, dass die Wissenschaftler es nicht versuchen würden. Artikel über den „biotischen Holocaust", wie Myers ihn nennt, gehen üblicherweise davon aus, dass die überwiegende Mehrheit der Extinktionen in den mittel- und südamerikanischen Tropen stattfindet. Süßwasserfische, von denen über ein Viertel als bedroht eingestuft werden, sind besonders empfindlich. „Ich arbeite in Venezuela, wo es bedeutend mehr Süßwasserfische gibt als in ganz Nordamerika. Und nach 30 Jahren haben wir die Fischvielfalt hier einigermaßen erfasst", meint Winemiller, „aber wir können keinen einzigen dokumentierten Fall einer Extinktion vorweisen."

Ähnliches gelte für andere Organismengruppen, behauptet er. „Wenn Sie nach konkreten Beweisen dafür suchen, dass jedes Jahr dutzende, hunderte oder tausende Arten verschwinden, werden Sie keine finden. Das kann an der schrecklich unzureichenden Datenbasis liegen", gibt er zu. „Aber man sollte die Möglichkeit nicht ausschließen, dass die Situation gar nicht so verheerend ist, wie jeder befürchtet."

Unbestechliche Logik eines Dramas

Die Katastrophen-Szenarien basieren auf mehreren, voneinander unabhängigen Indizienketten, die alle auf hohe und schnell steigende Extinktionsraten hindeuten. Die breiteste Zustimmung findet dabei die Theorie vom Fläche-Arten-Verhältnis. „Ganz allgemein gilt: Wenn ein Lebensraum schrumpft, nimmt die Zahl der dort lebenden Arten proportional zum Flächenverlust ab – und zwar mit der dritten bis sechsten Wurzel", erklärt Wilson, der diese Beziehung vor über 30 Jahren abgeleitet hat. „Ein mittlerer Wert wäre die vierte Wurzel, was bedeuten würde: Wenn Sie 90 Prozent des Lebensraumes vernichten, sinkt die Artenzahl auf die Hälfte."

„Aus dieser groben Schätzung und der Rate, mit der der Tropische Regenwald vernichtet wird, nämlich rund ein Prozent pro Jahr", fährt Wilson fort, „lässt sich vorhersagen, dass etwa ein viertel Prozent der Arten entweder direkt ausgelöscht oder zu einem baldigen Ende verurteilt wird." Bei einem Bestand von ungefähr zehn Millionen Arten sollten also jährlich etwa 25 000 untergehen. ▶

Die Palette des Lebens

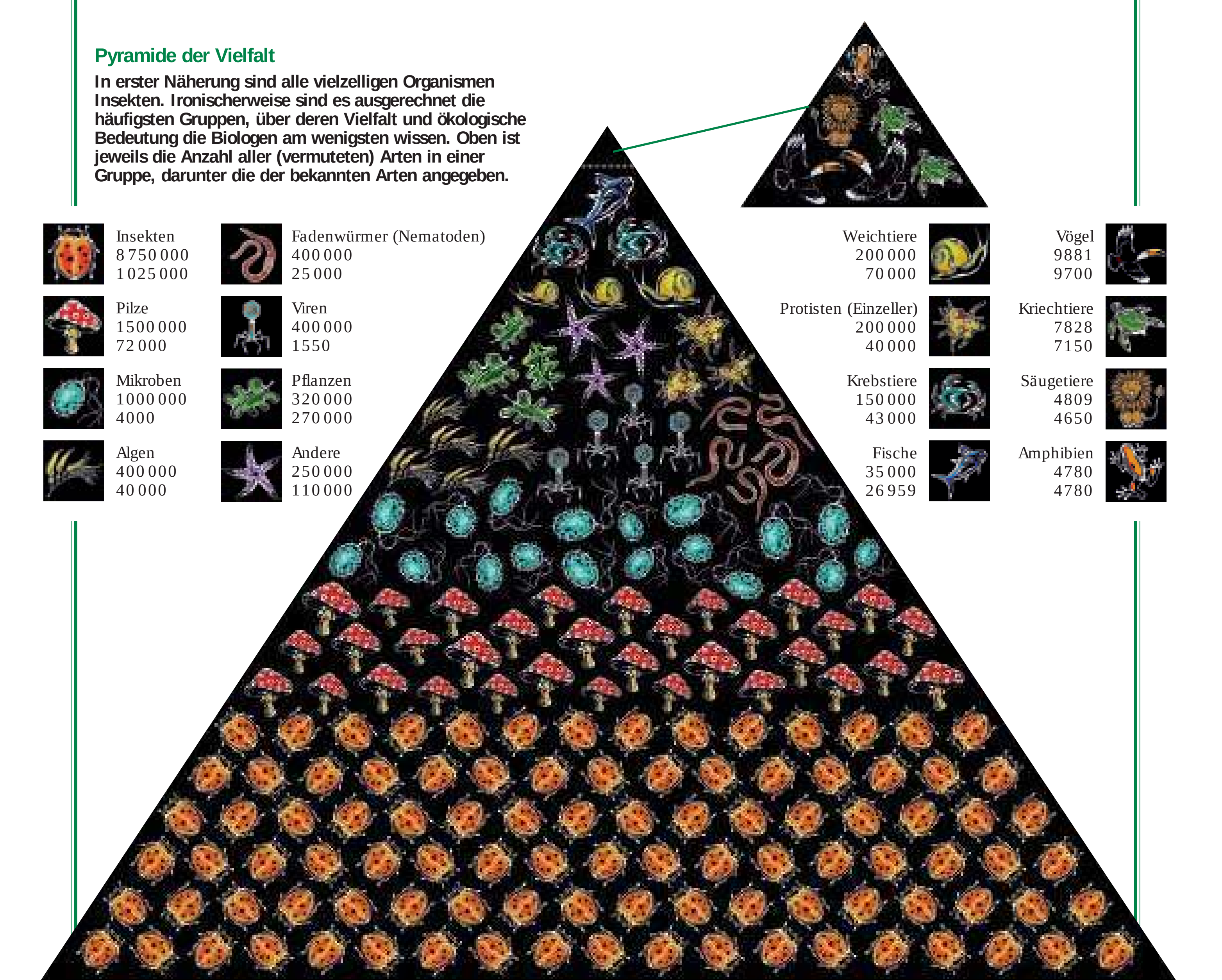
Wie schlimm ist das momentane Artensterben? Die Antwort hängt im Wesentlichen davon ab, wie viele Arten es insgesamt gibt. Je mehr es sind, desto mehr erlöschen jedes Jahr durch natürliche Ursachen oder entstehen neu. Auch wenn die Biologen den Stammbaum des Lebens in groben Umrissen kennen, sind sie noch sehr unsicher darüber, wie viele Zweige von jedem Ast ausgehen. Und bei den Bakterien, Viren und Archaeen (einem Organismenreich aus einzelligen Lebewesen, das erst vor wenigen Jahrzehnten entdeckt wurde) gibt es überhaupt nur ganz vage Vorstellungen über die Anzahl der Äste.

Vögel, Fische, Säugetiere und Pflanzen sind dagegen gut bekannt. Als der Zoologe Robert M. May von der Universität Oxford sich ein Bild von den Arbeitsfeldern der etwa 5000 Taxonomen weltweit verschaffte, stellte er fest, dass jeweils etwa gleich viele von ihnen Wirbeltiere, Pflanzen und Wirbellose – also den überwältigenden Rest des Tierreichs – untersuchen. „Man möchte gerne glauben, dass diese Gewichtung eine vernünftige Einschätzung der Bedeutung der betreffenden Organismengruppen widerspiegelt“, sagt er. „Doch in meinen Augen ist das völliger Blödsinn! Egal, ob Sie sich dafür interessieren, wie sich Ökosysteme entwickelt haben, wie sie zur Zeit funktionieren oder wie sie vermutlich auf Klimaänderungen reagieren werden: Sie erfahren sehr viel mehr darüber, wenn Sie sich Mikroorganismen im Boden statt der allseits beliebten Säugetiere ansehen.“

In jeder Gruppe außer den Vögeln, konstatiert Peter Hammond vom Natural History Museum in London, werden heute in nie da gewesenem Tempo bisher unbekannte Arten entdeckt. Dies sei einigen neuen internationalen Projekten zu verdanken. So wurden bei einer alle Taxa umfassenden Inventur der Artenvielfalt im Great Smoky Mountains Nationalpark in North Carolina und Tennessee in den ersten 18 Monaten bereits 115 neue Arten gefunden – 80 Prozent davon Insekten oder Spinnentiere. Letztes Jahr gründeten 40 Wissenschaftler das „All Species Project“, eine Vereinigung mit dem (vermutlich utopischen) Ziel, alle lebenden Arten, Mikroorganismen eingeschlossen, innerhalb der nächsten 25 Jahre zu katalogisieren.

Ziel anderer Projekte wie „Global Biodiversity Information Facility“ und „Species 2000“ ist der Aufbau von Datenbanken im Internet. Hier sollen Artbeschreibungen niedergelegt werden, die bis jetzt noch in den Universitäten und Museen der Welt verstreut sind. Wenn man Artenvielfalt ganz pragmatisch als die Anzahl der Lebensformen definiert, von denen wir wissen, dann wächst sie zurzeit in atemberaubendem Tempo.

SARA CHEN; QUELLEN: ENCYCLOPEDIA OF BIODIVERSITY, HERAUSGEGEBEN VON S. A. LEVIN; BIODIVERSITY HOTSPOTS FOR CONSERVATION PRIORITIES“ VON N. MYERS ET AL. IN: NATURE, BD. 403, S. 853, 24. FEBRUAR 2000; WILLIAM ESCHEMEYER (FISCHE); MARC VAN REGENMORTEL (VIREN); IUCN ROTE LISTE



Pyramide der Vielfalt

In erster Näherung sind alle vielzelligen Organismen Insekten. Ironischerweise sind es ausgerechnet die häufigsten Gruppen, über deren Vielfalt und ökologische Bedeutung die Biologen am wenigsten wissen. Oben ist jeweils die Anzahl aller (vermuteten) Arten in einer Gruppe, darunter die der bekannten Arten angegeben.

Lomborg bestreitet das. Fläche-Arten-Verhältnisse wurden, so sein Haupteinwand, durch Vergleich der Artenzahl auf verschieden großen Inseln entwickelt und seien deshalb nicht unbedingt auf zersplitterte Lebensräume auf dem Festland anwendbar. „Mehr als 50 Prozent der Vogelarten Costa Ricas kommen in weitgehend entwaldeten ländlichen Regionen vor, und Ähnliches gilt für Säuger- und Schmetterlingsarten", resümierte die Biologin Gretchen Daily von der Universität Stanford jüngst in der Zeitschrift *Nature*. Auch wenn die Waldarten auf Ackerland und in kleinen Gehölzen nicht gerade üppig gedeihen, können die meisten dort zumindest überleben – für wie lange, weiß allerdings niemand.

Streit um ausgestorbene Vogelarten

Lomborg führt ein schlagendes Beispiel dafür an: Sowohl im Osten der USA als auch in Puerto Rico habe die Zerstörung von über 98 Prozent der Primärwälder keineswegs die Hälfte aller Vogelarten aussterben lassen. Vier Jahrhunderte der Waldrodung „resultierten in der Auslöschung nur einer Waldvogelart" von 200 in den USA und von sieben der sechzig in Puerto Rico heimischen Arten, versichert er.

Solche Kritik missverstehe die Theorie vom Fläche-Arten-Verhältnis, entgegnet Stuart L. Pimm von der Columbia-Universität in New York. „Die Zerstörung von Lebensräumen funktioniert wie eine Plätzchenform, mit der man schlecht durchmengten Teig aussticht," schrieb er vor zwei Jahren in *Nature*. „Arten, die nur in dem ausgestochenen Gebiet vorkommen, werden ausgerottet, solche mit größerem Verbreitungsgebiet dagegen nicht."

Von den 200 Waldvogelarten der amerikanischen Ostküste lebten laut Pimm bis auf 28 alle auch anderswo. Außerdem sei der Wald schrittweise abgeholzt worden und schrittweise nachgewachsen, wenn Ackerland wieder sich selbst überlassen wurde. Deshalb war sogar auf dem Höhepunkt der Rodungen – um 1872 – die Hälfte der ursprünglich bewaldeten Fläche immer noch oder wieder von Wäldern bedeckt. Für eine 50-prozentige Reduktion sagt die Fläche-Arten-Theorie voraus, dass 16 Prozent der endemischen Arten vernichtet würden: In diesem Fall wären das vier von 28 Vogelarten. Und genauso viele sind auch ausgestorben. Lomborg lässt eine dieser Arten unberücksichtigt, weil sie eine Unterart gewesen sein könnte, und zwei weitere, weil nicht sicher sei,



Warum Artenvielfalt sich nicht bezahlt macht:

Auf dem internationalen Entomologenkongress in Foz do Iguaçu (Brasilien) im vergangenen Sommer suchte Ebbe Nielsen, der Direktor der Nationalen Insektensammlung Australiens in Canberra, nach Gründen, weshalb bisher so wenig zur Rettung der bedrohten Arten auf der Welt geschehen ist – und das trotz der Konvention über biologische Vielfalt (CBD), die 1992 in Brasilien verabschiedet und von 178 Staaten unterzeichnet wurde. „Sie und ich können sagen, die Aussterberaten seien zu hoch und wir müssten [mit dem Vernichten von Arten] aufhören, aber um Politiker zu überzeugen, brauchen wir Gründe, die auch ihnen einleuchten", sagt er. „In den Entwicklungsländern ist der ökonomische Druck so groß, dass die Leute alles nutzen, was sie finden können, um bis morgen zu überleben. Solange das der Fall ist, wird es dort keinerlei Unterstützung für die Erhaltung der Artenvielfalt geben."

Jedenfalls so lange nicht, bis es profitabler werden könnte, einen Wald stehen und ein Feuchtgebiet feucht bleiben zu lassen, als dieses Land in Farmen, Äcker oder Parkplätze umzuwandeln. Leider haben viele von den Argumenten, mit denen Umweltschützer zu begründen suchen, warum jede der vielleicht zehn Millionen Arten auf der Erde einen wirtschaftlichen Nutzen habe, inzwischen an Überzeugungskraft verloren.

➤ Absicherung gegen Krankheit und Hunger

„Ein streng utilitaristisches Argument lautet: Das enorme genetische Reservoir, das in der Vielfalt der Populationen und Arten steckt, bildet letztendlich das Rohmaterial für die biotechnologische Revolution von morgen", erklärt Robert May von der Universität Oxford. „Es ist die Quelle neuer Medikamente." „Oder neuer Nahrungsmittel – für den Fall, dass mit den 30 Nutzpflanzenarten, die 90 Prozent der Kalorien für die menschliche Ernährung liefern, oder mit den 14 Tierarten, die 90 Prozent unserer Nutztiere ausmachen, irgendetwas passiert", ergänzt Edmund O. Wilson von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts).

„Einige Leute, die das behaupten, glauben vielleicht sogar daran", fährt May fort. „Ich nicht. In 20 bis 30 Jahren werden wir neue Medikamente" nicht aus neu entdeckten Pflanzen oder Mikroorganismen gewinnen, sondern „im Labor einem Zielmolekül auf den Leib schneidern, wie das heute schon ansatzweise geschieht."

Vor zehn Jahren erhielt das Nutzenargument Auftrieb durch Berichte, dass die Firma Merck 1,14 Millionen Dollar an InBio, eine Naturschutzorganisation in Costa Rica, für neue chemische Substanzen aus Arten des Regenwaldes gezahlt hätte. Der Vertrag sah Tantiemen an InBio vor, falls aus einer der Substanzen ein Medikament hervorgegangen wäre. Aber dazu kam es nicht, und Merck kündigte 1999 die Vereinbarung. 1989 wurde Shaman Pharmaceuticals gegründet, um traditionell genutzte Heilpflanzen zu vermarkten. Zwar kam sie bis zu weit fortgeschrittenen klinischen Studien, machte dann aber Konkurs.

Wie Wilson in „Des Lebens ganze Fülle" schreibt, lagern 90 Prozent der bekannten Rassen der wichtigsten Nutzpflanzen in Samenbanken. Unter diesen Umständen sind Nationalparks wohl kaum die preiswerteste Rückversicherung gegen eine eventuelle Katastrophe in der Landwirtschaft.

➤ Ökosysteme als Dienstleister

„Das potenziell stärkste Argument", meint May „ist im weiteren Sinne utilitaristisch: Ökosysteme leisten uns Dienste, deren Wert wir erst schätzen lernen, wenn sie nicht mehr da sind." Beispielsweise dienen Tropenwälder der Klimaregulation, und unsere heimischen Wälder fungieren als Erholungsgebiete. Desglei-



FRANS LANTING, MINDEN PICTURES

die Argumentationsprobleme der Naturschützer

chen kann sich die Artenvielfalt einer Region als Touristenattraktion auch wirtschaftlich auszahlen. „Wir wissen nicht, wie sehr man diese Systeme vereinfachen kann, ohne dass sie ihre Funktion verlieren", bekennt May. „Wie schon Aldo Leopold, der Vater der Wildreservate, vor mehr als einem halben Jahrhundert sagte: Oberste Regel des intelligenten Herumbastelns ist, alle Teile zu behalten."

Laut Geoffrey Heal, Ökonom an der Columbia-Universität in New York, ist das Problem mit diesem Argument, dass „es keinerlei Sinn macht, den Wert eines Lebenserhaltungssystems danach bemessen zu wollen, was sein Ersatz kosten würde." Ökonomen könnten nur solchen Dingen einen Wert zuweisen, für die es einen Markt gibt. Wenn beispielsweise alles Öl verschwände, könnten wir auf andere Brennstoffe ausweichen, die 50 Dollar pro Barrel kosten. Aber für den heutigen Preis des Erdöls spielt das keine Rolle: Er liegt viel niedriger.

Neuere Experimente deuten darauf hin, dass sich die Biomasse auf einer gegebenen Landfläche und damit deren Fähigkeit zur Bindung von Kohlendioxid verringert, wenn ein Großteil der dort lebenden Arten verschwindet. Allerdings lässt sich derzeit nicht beurteilen, ob das auch für ganze Ökosysteme gilt. „Möglicherweise würde eine schrecklich vereinfachte Welt – wie diejenige in dem Kultfilm „Blade Runner" – so funktionieren, dass wir darin überleben könnten", räumt May ein.

➤ Appell an die Verantwortung

Die Wissenschaft weiß so wenig über die Millionen Arten da draußen, ganz zu schweigen von den komplexen Aufgaben, die jede einzelne in ihrem Ökosystem erfüllt, dass die mögliche ökonomische Bedeutung bedrohter Spezies leicht unerkannt bleibt. Ein moralischer Appell könnte da die letzte Hoffnung sein – jedenfalls haben Appelle an das Verantwortungsbewusstsein der Entscheidungsträger bisher am meisten bewirkt. Aber ist es nicht problematisch für Wissenschaftler, zu diesem Mittel zu greifen?

Sie tun es jedenfalls, und zwar auf verschiedene Weisen. Für Wilson „ist jede Art ein Millionen Jahre altes Meisterstück der Evolution, codiert durch fünf Milliarden genetische Buchstaben und vorzüglich an die ökologische Nische angepasst, die es besetzt." Aus diesem Grund „trägt", wie der Biologe David Ehrenfeld in seinem Buch „Die Arroganz des Humanismus" schreibt, „jede lang dauernde Existenz in der Natur ... das unantastbare Recht auf Fortdauer eben dieser Existenz in sich."

Die öffentliche Anerkennung eines solchen Rechts dürfte allerdings viel Erziehungsarbeit und Überredungskunst erfordern. Laut einer Umfrage vom letzten Jahr kannte nur ein Viertel der Amerikaner den Begriff „Biodiversität". Zwar äußerten sich immerhin drei Viertel besorgt über den Verlust von Arten und Lebensräumen, aber das ist ein Rückgang gegenüber 87 Prozent im Jahr 1996. Und May merkt an, dass die Vorstellung von der Verantwortung für die biologische Vielfalt „ein Luxus" ist, den sich nur entwickelte Länder leisten können. „Würden wir in tiefster Armut leben und versuchen, fünf hungrige Mäuler zu stopfen, fände diese Idee bei uns weniger Anklang."

Es gibt einen weiteren Vorbehalt. Wenn Wissenschaftler „im Namen der biologischen Vielfalt missionieren" – wie Wilson, Lovejoy, Ehrlich und viele andere das getan haben –, sollten sie bedenken, dass „das gefährlich sein kann", meint David Takacs von der California State University in Monterey Bay. „Parteinahme untergräbt leicht den Eindruck von Neutralität und Objektivität. Diese Werte sind es aber, die Laien überhaupt dazu bringen, auf Wissenschaftler zu hören." Und dennoch: Wenn nicht einmal die, die bedrohte Arten am besten kennen und am meisten lieben, offen für sie eintreten dürfen, wer soll es dann?

dass sie wirklich der Entwaldung zum Opfer fielen.

Aber selbst wenn die Fläche-Arten-Beziehung Bestand haben sollte, verweist Lomborg auf offizielle Statistiken, wonach die Entwaldung sich verlangsamt hat und nun deutlich unter einem Prozent pro Jahr liegt. So schätzte die Food and Agriculture Organization der U.N. vor kurzem, dass der Waldbestand zwischen 1990 und 2000 weltweit nur noch um durchschnittlich 0,2 Prozent pro Jahr geschrumpft ist: 11,5 Millionen Hektar wurden gefällt, und 2,5 Millionen Hektar sind nachgewachsen.

In den meisten tropischen Gebieten betrug die jährliche Entwaldungsrate allerdings ein halbes Prozent, und dort lebt die überwiegende Mehrheit der seltenen und bedrohten Arten. Obwohl sich Artenschützer also „hin und wieder mit den Zahlen vertun, vielleicht auch verführt von ihrem Eifer, die Öffentlichkeit aufzurütteln", träfen ihre Schätzungen doch im Großen und Ganzen zu, urteilt Carlos A. Peres, ein brasilianischer Ökologe an der Universität von East Anglia in England.

Heikle Hochrechnungen

Ökologen haben auch mit anderen Methoden versucht, die künftige Entwicklung der Aussterberaten zu erfassen. May und seine Mitarbeiter verfolgten zu diesem Zweck, wie sich Wirbeltier- und Pflanzenarten über einen Zeitraum von vier bzw. zwei Jahren durch die Gefährdungsgrade der IUCN-Datenbank bewegten. Diese kurzfristigen Änderungen projizierten sie weit in die Zukunft. Daraus leiteten sie ab, dass die Aussterberaten in den nächsten 300 Jahren 12- bis 55-fach steigen werden.

Zu ähnlichen Schlüssen kam Georgina M. Mace, wissenschaftliche Leiterin der Zoologischen Gesellschaft London. Sie verglich Modellrechnungen miteinander, in denen die Überlebenswahrscheinlichkeiten für einige sehr gut bekannte Arten berechnet wurden. Der Entomologe Nigel E. Stork vom Naturhistorischen Museum in London wiederum stellte fest, dass in Großbritannien das Extinktionsrisiko für Vögel etwa zehnmal so hoch ist wie für Insekten. Indem er solche Verhältniszahlen auf den Rest der Welt extrapolierte, gelangte er zu der Prognose, dass bis zum Jahr 2300 etwa 100 000 bis 500 000 Insektenarten aussterben würden. Lomborg dagegen kommt mit demselben Ansatz zu dem Schluss, dass „die Extinktionsrate für alle Tierarten unter 0,208 Prozent pro Dekade und wahr- ▶

scheinlich unter 0,7 Prozent in 50 Jahren bleiben wird.“

Für jeden Wissenschaftler bedeutet es einen geradezu heldenmütigen Akt, derart langfristige und umfassende Voraussagen auf der Grundlage einer so dünnen und wackeligen Datenbasis zu machen. Dies gilt umso mehr, als die Angaben über Bedrohungsgrade nach Mays Meinung „wohl mehr über die Zufälle der Zählungen, die Vorlieben der Taxonomen und die Unwägbarkeiten der Datenerfassung als über die tatsächlichen Änderungen des Status einer Art aussagen.“

Allerdings sprechen auch theoretische Untersuchungen dafür, dass ein Massenaussterben, sofern es noch nicht begonnen hat, doch unmittelbar bevorsteht. Kevin Higgins von der Universität von Oregon in Eugene präsentierte auf der Konferenz in Hilo ein Computermodell, welches das Schicksal einer Population aus künstlichen Organismen verfolgt, indem es Mutationsraten, Fortpflanzungserfolg und ökologische Interaktionen der „Tiere“ simuliert. Wie er dabei herausfand, sind „Mutationen in kleinen Populationen so unscheinbar, dass die natürliche Selektion sie nicht herausfiltert. Dies verkürzt die Zeit bis zum Aussterben ganz dramatisch.“ Wenn Lebensräume schrumpfen und Populationen sich dadurch verkleinern, „könnte dies zu einer Zeitbombe werden, zu einem Aussterben, das unter der Oberfläche stattfindet,“ warnt Higgins. Vielleicht gehören „viele der Arten, die heute in Schwierigkeiten sind, in Wirklichkeit schon zu den Todgeweihten“, wie David S. Woodruff, Ökologe an der Universität von Kalifornien in San Diego, im vergangenen Mai in den *Proceedings of the National Academy of Sciences* schrieb. Aber den Beweis zu führen, dass die Zeitbombe da draußen in der Wildnis bereits tickt, dürfte nicht leicht werden.

Was geschieht wohl mit den Feigenbäumen, die mit 900 Arten die häufigste Pflanzengattung der Tropen bilden, wenn die eine parasitische Wespenart verloren geht, die sie jeweils befruchtet? Oder was wird aus den 79 Prozent der Bäume auf Samoa, die das Kronendach des Regenwalds bilden, wenn Jäger die Flughunde töten, von denen ihre Fortpflanzung abhängt? Eine der größten Befürchtungen vieler Naturschützer ist, dass die Gebäude ganzer Ökosysteme einstürzen, wenn nur ein paar tragende Säulen entfernt werden.

Andere misstrauen dieser Metapher. „Mehrere jüngere Studien scheinen zu zeigen, dass gewisse Redundanzen in Ökosystemen vorhanden sind“, sagt Melodie A. McGeoch von der Universität Pretoria in Südafrika. Zwar gibt sie zu, dass die Redundanzen von heute schon morgen die letzte Reserve sein könnten. Dennoch erklärt sie: „Es leuchtet wirklich nicht ein, warum die Mehrheit der Arten untergehen sollte, wenn die Selektionsdrücke geringfügig höher sind, als sie es ohne den Menschen wären. Man kann schon davon ausgehen, dass die Evolution für eine gewisse Zähigkeit der Lebensgemeinschaften sorgt.“

Unerwartete Schonfrist?

Wenn es die natürliche Auslese nicht tut, dann vielleicht die künstliche. Das scheinen jüngste Untersuchungen von Werner Greuter von der Freien Universität Berlin, Thomas M. Brooks von Conservation International und anderen zu lehren. Greuter verglich die aktuellen Aussterberaten von Pflanzen in drei ökologisch verwandten Regionen. Dabei entdeckte er, dass die am längsten besiedelte und am stärksten gestörte Region – der Mittelmeerraum – die geringsten Verluste aufwies. In Kalifornien sowie in Südafrika gab es mehr Extinktionen und in Westaustralien die meisten. Dieser scheinbar paradoxe Befund ließe sich damit erklären, dass Arten, die mit der Landnutzung durch den Menschen nicht zurechtkommen, schon bald nach Einführung der Landwirtschaft aussterben. Die verbleibenden Spezies wären dann besser dafür gerüstet, sich gleichsam vor den Pfeilen zu ducken, die wir nach ihnen werfen. Das durch die Menschheit verursachte Artensterben sollte sich also mit der Zeit abschwächen.

Das hätte beträchtliche Implikationen. Unsere Ahnen könnten in seit langem besiedelten Gegenden wie Europa und Asien schon vor Jahrtausenden mehr Arten vernichtet haben, als wir glauben mögen. Auf der anderen Seite bleibt uns vielleicht eine längere Schonfrist, als befürchtet, um Katastrophen dort zu verhindern, wo Menschen schon seit einer ganzen Weile Teil der Ökosysteme sind. Allerdings hätten wir dann auch weniger Zeit als erhofft, um solche Katastrophen in den wenigen Regionen der Wildnis zu verhüten, die noch unberührt geblieben sind.

„Es stellt sich die Frage, wie wir mit der Unsicherheit umgehen sollen, denn es gibt einfach keinen Weg, sie zu beseitigen“, erklärt Winemiller. Angesichts dieser Situation hält er es für falsch, die Problematik des Artensterbens als Aufhänger für Naturschutzbewegungen zu verwenden. „Wenn sich [die alarmierenden Prognosen] als falsch erweisen, was bleibt dann?“

Die Naturschützer stünden dann nur noch mit einer Hand voll schwacher politischer und wirtschaftlicher Argumente da. Deshalb verschanzen sich einige hinter weit vorgezogenen Verteidigungslinien. „Wenn wir nicht sagen, dass der Verlust auch nur einer Art inakzeptabel ist, haben wird keine feste Position, die wir verteidigen können. Wir würden dann immer weiter zurückgedrängt, während die Verluste sich anhäufen“, argumentierte Brooks auf der Tagung in Hilo. Aber Verluste seien unvermeidlich, hält Wilson dagegen, solange die Weltbevölkerung nicht zu wachsen aufhöre.

Er nennt das den Flaschenhals. „Wir müssen durch das Gerangel um die verbleibenden Ressourcen hindurch, bis wir – vielleicht irgendwann im 22. Jahrhundert – in eine Ära des Bevölkerungsrückgangs kommen. Unsere Aufgabe ist es, so viel Artenvielfalt wie möglich mit hinüber zu retten“. Die Biologen sind jedoch uneins über die Frage, ob die wenigen Sympathie weckenden Arten, die jetzt als gefährdet gelten, bestimmen sollen, was durch den Flaschenhals gelangt.

Geschäfte zugunsten der Natur

„Das Argument, dass alles andere auch gerettet wird, wenn man nur Vögel und Säugetiere schützt, hält einer genaueren Überprüfung nicht stand“, sagt May. Ein vernünftigeres Ziel sei es „zu versuchen, möglichst viel von der Evolutionsgeschichte zu bewahren.“ Weitaus wertvoller als ein Panda oder ein Nashorn sind nach Ansicht von May lebende Fossilien wie der Tuatera (im Deutschen auch Brückenechse genannt) – ein großes, leguanartiges Reptil, das ausschließlich auf Inseln vor der Küste Neuseelands vorkommt. Es ist in nur zwei Arten von einer Tiergruppe übrig geblieben, die vor derart langer Zeit vom Stammbaum der Reptilien abzweigte, dass dieses Paar nun eine Gattung, eine Ordnung und fast eine Unterklasse ganz für sich allein einnimmt.

Literaturhinweise

„Life Counts – eine globale Bilanz des Lebens“. Von M. Gleich et. al. (Hg.). Berlin 2000.

Des Lebens ganze Fülle. Von E. O. Wilson. Claassen, München 1999.

Ende der biologischen Vielfalt? Von E. O. Wilson (Hg.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1992.

*Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft“.*



FRANS LANTING, MINDEN PICTURES

Tropische Regenwälder wie hier in Borneo bergen den größten Artenreichtum. Ihre Zerstörung durch den Menschen wird daher besonders vielen Spezies zum Verhängnis – von denen die meisten bisher nicht einmal bekannt sind.

Woodruff beruft sich dagegen auf ein noch allgemeineres Prinzip. „Einige von uns verfechten einen Wechsel von der Rettung von Dingen, den Ergebnissen der Evolution, zur Rettung des zu Grunde liegenden Vorgangs, nämlich der Evolution selbst", schreibt er. „[Sie] wird uns letztendlich die kostengünstigste Lösung für das gesamte Problem des Naturschutzes bescheren."

Es gibt immer noch einige wenige große Gebiete, in denen allein die natürliche Auslese bestimmt, welche Arten Erfolg haben und welche zu Grunde gehen. „Warum sollen wir nicht funktionierende Ökosysteme retten, die bisher noch nicht ausgeplündert wurden?", fragt Winemiller. „Orte wie die Plateauregion Guyanas in Südamerika enthalten viel mehr Arten als einige der so genannten Hotspots." Solche Gebiete zu retten hieße Landflächen zu kaufen, die groß genug sind, um ganze Ökosysteme zu umschließen und ihnen noch genügend Raum zu lassen, sich bei wechselnden Klimabedingungen nord- oder südwärts zu verlagern. Dies dürfte nicht unmöglich sein; denn völlig unerschlossenes Land ist relativ billig. In den gekauften Arealen müsste dann jegliche Nutzung durch den Menschen verboten werden.

„Wie die Erfahrung lehrt, ist es viel einfacher, einem Vorstandsvorsitzenden oder einem Milliardär die Wichtigkeit des Themas nahe zu bringen, als die amerikanische Öffentlichkeit zu überzeugen", meint Wilson. „Mit einem Ted Turner, Gordon Moore oder Craig McCaw kommt man fast so weit wie mit einem ziemlich großzügigen Batzen aus dem Fördertopf einer Industrienation." (Gordon Moore war Gründer und langjähriger Vorstandsvorsitzender von Intel, Ted Turner ist US-Medienmogul und Gründer von CNN, Craig McCaw hat sich als Pionier der drahtlosen Telekommunikation einen Namen gemacht. Sie alle zählen zu den fünfzig reichsten Personen auf der Welt.)

„Vielleicht sogar weiter", bestätigt Richard E. Rice, Chefökonom bei Conservation International (CI). Mit Geldern von Moore, McCaw, Turner und anderen Spendern überbot CI Unternehmen der Holzindustrie, als es um den Kauf von Waldland in Surinam und Guyana ging. In Bolivien, so berichtet Rice „erhielten wir eine Fläche von der Größe Rhode Islands für die Hälfte dessen, was ein Haus in meiner Gegend kostet." Und Nature Conservancy war in der Lage, für nur 1,5 Millionen Dollar ein Stück Regenwald so groß wie der Yellowstone Nationalpark zu erwerben. Ende Juli letzten Jahres vergab Peru an eine Umweltorganisation die erste „Naturschutzkonzession" des Landes: im Wesentlichen eine verlängerbare Pacht für das Recht, das Land – in diesem Fall 130000 Hektar Wald – nicht zu erschließen. Peru habe bis jetzt etwa 60 Millionen Hektar seiner Staatswälder für solche Konzessionen bereitgestellt, sagt Rice. Ähnliche Verträge werden mit Guatemala und Kamerun angestrebt.

„Sogar ohne massive Unterstützung durch die Öffentlichkeit und ohne eine wirklich wirksame Politik der US-Regierung wenden sich die Dinge zum Besseren", sagt Wilson mit einer Mine, die vorsichtigen Optimismus widerspiegelt. Vielleicht ist es ja wirklich noch zu früh zum Verzweifeln. ■

W. Wayt Gibbs *ist Redakteur bei Scientific American.*



PSYCHOLOGIE

Tests mit kleinen Fehlern

„Projektive Verfahren" wie der Rorschach-Test gehören zum Standardrepertoire der Psychologen. Ob damit die Persönlichkeit der Befragten wirklich zuverlässig zu beurteilen ist, gilt immer mehr als fraglich.

Von Scott O. Lilienfeld, James M. Wood und Howard N. Garb

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte, geht eine Redensart, doch manche Bilder sollen gerade Worte hervorbringen. Ein Psychologe zeigt einer Person einen Tintenklecks und ermuntert sie, darin Bilder zu sehen und zu beschreiben. Vielleicht zeigt er ihr auch die Darstellung eines Mannes, der sein Gesicht von einer Frau abwendet, die ihn am Arm packt. Derartige Tests gehören zum Standardrepertoire von Persönlichkeitstests, denn viele Psychologen glauben, die Befragten würden sich bei ihrer Antwort von Gefühlen, Erfahrungen, Erinnerungen und Vorstellungen leiten lassen, sich also selbst in die Deutungen projizieren. Geschulte Auswerter seien, so die These, demgemäß in der Lage, aus den Antworten auf Persönlichkeitsmerkmale, unbewusste Bedürfnisse und psychische Gesundheit zu schließen.

Aber treffen diese Schlussfolgerungen wirklich zu? Immerhin haben die Beurteilungen oft erhebliche Konsequenzen. Projektive Verfahren dienen beispielsweise dazu, psychische Störungen zu diagnostizieren oder vorherzusagen, ob Straftäter nach einer Haftentlassung wieder gewalttätig werden. Mit diesen Techniken wird die psychische Stabilität von Eltern beurteilt, die sich um das Sorgerecht für ihre Kinder streiten, und eruiert, ob Kinder sexuell belästigt wurden.

Vor kurzem sichtete unser Team eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zur Güte projektiver Verfahren. Im Mittelpunkt standen drei der am häufigsten eingesetzten und am besten untersuchten Verfahren. Die Ergebnisse dabei waren schlichtweg Besorgnis erregend.

Der bekannte Rorschach-Test – bei dem die Probanden beschreiben sollen, was sie auf zehn aufeinander folgenden Tintenklecks-Tafeln erkennen – ist unter allen projektiven Verfahren das populärste. Der in den zwanziger Jahren von dem Schweizer Psychiater Hermann Rorschach (1884–1922) eingeführte Test geriet bereits in den fünfziger und sechziger Jahren in das Kreuzfeuer der Kritik, unter anderem deshalb, weil er nicht standardisiert war und keine Normwerte aufführte. Eine Standardisierung ist aber erforderlich, denn selbst scheinbar geringfügige Unterschiede in der Anwendung eines Verfahrens beeinflussen die Reaktionen von Probanden. Normwerte, das heißt Durchschnittswerte der Allgemeinbevölkerung, sind gleichfalls von großer Bedeutung, denn sie liefern den Bezugsrahmen einer Beurteilung: Liegt die Reaktion des Befragten noch innerhalb oder schon außerhalb einer akzeptablen Bandbreite?

Diese Probleme des frühen Rorschach-Tests korrigierte der damals an der Universität von Long Island tätige Psychologe John E. Exner in den siebziger Jahren durch das *Rorschach Comprehensive System.* Es enthält detaillierte Regeln für die Anwendung des Tintenklecks-Tests und für die Interpretation der Antworten sowie Normwerte für Kinder und Erwachsene.

Trotz seiner Popularität weist aber auch das Exner-System in zwei entscheidenden Punkten Mängel auf, an denen ▶

Können Kleckse lügen? Früher „Röntgenbild der Seele" genannt, halten Wissenschaftler den Rorschach-Test heute für fragwürdig. Wie bei anderen projektiven Verfahren auch lassen sich weder Zuverlässigkeit noch Validität belegen.

auch schon der ursprüngliche Test krankte: Es mangelt an Zuverlässigkeit und Gültigkeit (fachlich „Reliabilität“ beziehungsweise „Validität“). Ein zuverlässiges Verfahren führt unabhängig davon, wer es anwendet und die Antworten auswertet, zu vergleichbaren Ergebnissen; ein gültiges Verfahren misst, was es messen soll. Nur unter diesen Bedingungen lässt sich anhand von Testergebnissen etwa das Verhalten einer Person – wie die Bereitschaft zu erneuter Gewalttätigkeit – seriös vorhersagen.

Die Ergebnisse eines Rorschach-Tests sind aber sehr stark vom jeweiligen Psychologen abhängig. Der beurteilt zunächst alle Antworten anhand von mehr als hundert Merkmalen oder Variablen. Er hält zum Beispiel fest, ob der Proband das gesamte Tintenklecks-Muster oder nur Teile davon ansah, ob die Bilder, die er entdeckte, im Vergleich zu den Deutungen der meisten getesteten Personen üblich oder unüblich waren, und ob Form oder eher Farbe bestimmte, was der Proband sah.

Anschließend werden diese Testergebnisse interpretiert und zu einem psychologischen Profil des Probanden zusammengestellt. Dabei kann der Beurteiler beispielsweise zu dem Schluss kommen, dass die Konzentration auf winzige Details wie verstreute Kleckse statt auf ganze Bilder Zwanghaftigkeit signalisiere, und dass das Erkennen von Objekten in den weißen Flecken innerhalb der größeren Tintenkleckse auf eine negative, widerspenstige Ader hindeute.

Eine hohe Reliabilität in der Bewertung einer Variablen setzt voraus, dass zwei verschiedene Auswerter mit hoher Wahrscheinlichkeit zu vergleichbaren Ergebnissen gelangen, wenn sie die Antworten derselben Person untersuchen. Neuere Studien zeigen jedoch, dass das nur bei etwa der Hälfte der untersuchten Merkmale zutrifft; bei den übrigen können die Auswerter zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen kommen.

Analysen der Validität des Rorschach-Tests deuten zudem darauf hin, dass er sich nicht besonders gut zur Diagnose der meisten psychiatrischen Krankheitsbilder eignet. Entgegen den Behauptungen einiger Befürworter gelingt es unseres Erachtens mit diesem Verfahren nicht, Depression, Angststörungen oder eine durch Unehrlichkeit, Gefühllosigkeit und mangelndes Schuldbewusstsein gekennzeichnete psychopathische Persönlichkeit sicher zu diagnostizieren. Es gibt aber auch Ausnahmen von der Regel: Gut geeignet ist der Test wohl für Schizophrenie sowie andere durch Störungen des Denkens gekennzeichnete Krankheitsbilder, zum Beispiel bipolare Störungen wie die manische Depression.

Häufig soll der Rorschach-Test eine Neigung zu Gewalttätigkeit, kriminellem Verhalten und Störungen der Impulskontrolle beurteilen; doch die meisten Forschungsarbeiten deuten darauf hin, dass auch hier die Gültigkeit gering ist. Ebenso wenig gelang bisher der Nachweis, dass der Test geeignet sei, den sexuellen Missbrauch von Kindern festzustellen.

Inzwischen zeigen sich weitere problematische Seiten des Verfahrens. Es deutet viel darauf hin, dass die verwen-

Der Rorschach-Test

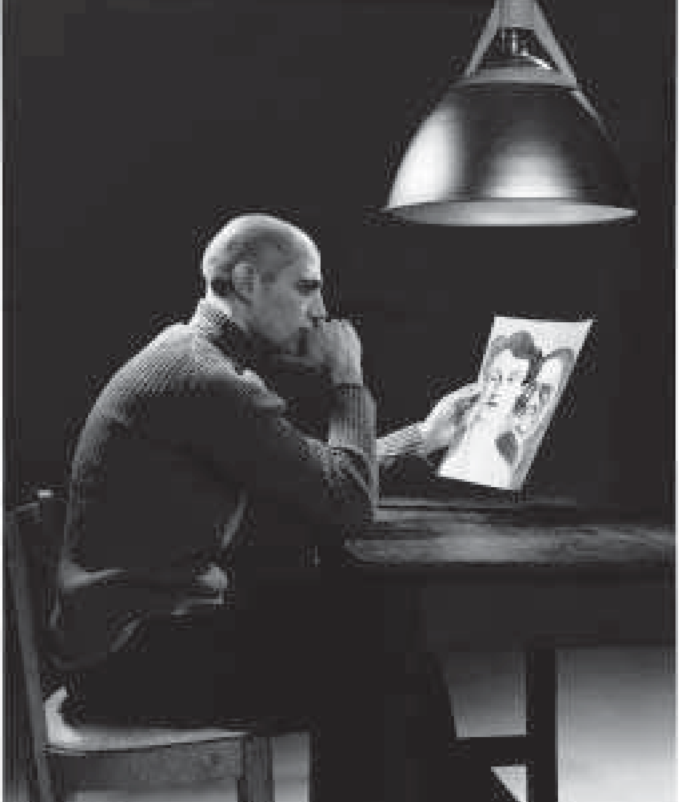
Vergeudete Tinte?

Es sieht aus wie zwei Dinosaurier mit riesigen Köpfen und winzigen Körpern. Sie bewegen sich voneinander weg, schauen aber rückwärts. Der schwarze Klecks in der Mitte erinnert mich an ein Raumschiff.“

Der Rorschach-Tintenklecks-Test liefert „Röntgenbilder des Fühlens und Denkens“, so der frühe Glaube. Auch heute noch ist er das berühmteste projektive psychologische Verfahren. Ein Untersucher zeigt einem Betrachter nacheinander zehn symmetrische Tintenklecks-Bilder in einer festgelegten Reihenfolge, und der Betrachter beschreibt jeweils seinen Eindruck. Fünf Tintenkleckse sind farbig, fünf sind schwarz und grau. Der Betrachter kann die Bilder drehen. Bei der Abbildung rechts handelt es sich übrigens um die gedrehte Wiedergabe eines Gemäldes von Andy Warhol; die „echten“ Rorschach-Bilder werden nicht veröffentlicht (allerdings kursieren im Internet angeblich Abbildungen der Originale mit Vorschlägen für die Deutung).

Die Reaktionen auf die Tintenkleckse lassen nach Meinung der Befürworter verschiedene Aspekte der Per-





Der thematische Apperzeptionstest (TAT) wurde in den dreißiger Jahren an der Universität Harvard entwickelt. Der Tester legt dem Probanden bis zu 31 Karten vor, auf denen mehrdeutige Situationen dargestellt sind. Intrigiert die ältere Frau oder hilft sie der jüngeren? Die meisten Psychologen werten die Antworten intuitiv aus, die Ergebnisse sind nicht vergleichbar.



sönlichkeit erkennen und geben Auskunft über die psychische Gesundheit des Probanden. So soll ein Erkennen sich bewegender Tiere – wie der genannten Dinosaurier – oft auf Impulsivität deuten, während Hinweise auf die „Schwärze“ eines Kleckses – wie bei dem Raumschiff – eine Depression anzeigen könne.

Der Schweizer Psychiater Hermann Rorschach erhielt die Anregung für den Tintenklecks-Test wahrscheinlich durch ein europäisches Gesellschaftsspiel. Der Test erschien 1921 und war in der Zeit um 1945 weithin anerkannt. In den fünfziger Jahren wurde er sehr stark kritisiert, da Wissenschaftler feststellten, dass Psychologen dieselben Antworten oft unterschiedlich interpretierten, und dass bestimmte Antworten schlecht mit spezifischen psychischen Störungen oder Persönlichkeitsmerkmalen korrelierten.

Heutzutage wird zur Auswertung häufig das *Rorschach Comprehensive System* nach Exner eingesetzt, das diese Schwächen des Tests ausgleichen soll. Doch es wird aus denselben Gründen kritisiert wie der Test selbst. Außerdem deuten verschiedene neuere Ergebnisse darauf hin, dass das Exner-System viele Probanden zu Unrecht als pathologisch etikettiert.

deten Normwerte für psychische Gesundheit beziehungsweise Störungen die amerikanische Bevölkerung nicht repräsentativ wiedergeben, und dass viele Erwachsene und Kinder dementsprechend zu Unrecht als fehlangepasst beurteilt worden sind. Beispielsweise gelangte im Jahr 1999 eine Studie mit 123 erwachsenen Freiwilligen in einer kalifornischen Blutbank zu nicht akzeptablen Ergebnissen: Bei jedem sechsten Teilnehmer deuteten die Variablen auf eine Persönlichkeitsstörung hin.

Insbesondere bei Minderheiten dürften die Tintenklecks-Tests oft irren. Untersuchungen haben gezeigt, dass Afro-Amerikaner, Amerikaner indianischer Abstammung, solche aus Alaska, Hispano-Amerikaner sowie Mittel- und Südamerikaner deutlich anders auf die Bilder reagieren, als der Norm entspricht – die offensichtlich eher das Verhalten einer weißen Mehrheit spiegelt. Solche Studien lassen erhebliche Zweifel daran aufkommen, ob Rorschach-Tests in der psychotherapeutischen Praxis und bei Gericht verwendet werden sollten.

Ein weiteres projektives, nicht weniger problematisches Verfahren ist der thematische Apperzeptionstest (TAT). Dort werden die Probanden aufgefordert, zu insgesamt 31 Bildtafeln, auf denen mehrdeutige Szenen dargestellt sind, Geschichten zu erfinden. Zu den Motiven gehört ein Junge, der eine Geige betrachtet, eine aufgeregte Frau, die eine Tür zuschlägt und die eingangs erwähnte Darstellung eines Mannes und einer Frau; eine Karte ist als Inbegriff von Mehrdeutigkeit ganz leer.

Der TAT wurde auch schon als „Freude des Klinikers und Frust des Statistikers“ bezeichnet, weil auch er kaum standardisiert ist: Jeder Kliniker legt seinen Probanden eine andere Anzahl und Auswahl von Bildern vor. Außerdem deuten die meisten von ihnen die Geschichten intuitiv, anstatt Regeln anzuwenden. Eine jüngere Studie zum TAT-Gebrauch an nordamerikanischen Jugend- und Familiengerichten, an der fast

Andere projektive Verfahren

Für manche Anwendungen geeignet

Der Rosenzweig P-F Test
Eine Comic-Figur äußert sich einer anderen gegenüber provozierend. Der Betrachter entscheidet, wie die zweite Person reagieren soll. Dieses Verfahren, das auch in dem Film *Clockwork Orange* zu sehen war, sagt Aggression bei Kindern zuverlässig voraus.

Die Satzergänzung
Die Probanden ergänzen einen Satz wie „Wenn ich könnte, würde ich …“. Die meisten Versionen sind nicht gut untersucht. Der von Jane Loevinger von der Universität Washington entwickelte Test misst jedoch zuverlässig bestimmte Aspekte der Ich-Entwicklung, wie Moralempfinden und Empathie.

Fragwürdige Verfahren

Der Foto-Hand-Test
Die Probanden geben an, was in unterschiedlichen Positionen dargestellte Hände ihrer Ansicht nach tun. Mit diesem Verfahren werden Aggressivität, Angst und andere Persönlichkeitsmerkmale erfasst. Es ist bisher allerdings noch nicht gut untersucht.

Die Handschriftenanalyse (Grafologie)
Die Bewerter orientieren sich bei der Beurteilung der Persönlichkeit des Schreibenden an bestimmten „Merkmalen“ der Schrift. Das Verfahren ist zwar unbrauchbar, wird aber insbesondere zur Beurteilung von Stellenbewerbern immer noch verwendet.

Der Lüscher Farb-Test
Die Probanden ordnen farbige Karten nach ihrer Präferenz und geben dadurch angeblich ihre Persönlichkeitsmerkmale zu erkennen. Die meisten Studien beurteilen das Verfahren als wertlos.

Das Spiel mit anatomisch korrekten Puppen
Angeblich spielen sexuell missbrauchte Kinder oft mit den Genitalien von Puppen. Dieses Verhalten besitzt jedoch keine diagnostische Aussagekraft – viele nicht missbrauchte Kinder spielen ebenso.

Der Szonditest
Der Betrachter wählt aus Fotografien von Patienten mit verschiedenen psychiatrischen Störungen diejenigen aus, die ihm am besten und am wenigsten gefallen. Angeblich sagt die Auswahl der Bilder etwas über die Bedürfnisse des Probanden aus, diese Annahme wurde aber widerlegt.

hundert Psychologen teilnahmen, ergab, dass nur drei Prozent von ihnen mit einem standardisierten Auswertungsverfahren arbeiten. Das ist sehr bedenklich, denn es deutet einiges darauf hin, dass bei intuitiver Interpretation vorschnell psychische Störungen diagnostiziert werden.

Aber auch standardisierte Regelwerke für die Auswertung sind alles andere als unbedenklich, denn einige weit verbreitete erwiesen sich bereits als wenig verlässlich: Oft unterscheiden sich ihre Ergebnisse von einer Sitzung zur nächsten. Auch die Validität dieser Verfahren bewerten einige Studien nicht sonderlich positiv.

Einige wenige der genormten Methoden gelten als Kandidaten, um zumindest Aspekte einer Persönlichkeit auseinander zu halten – insbesondere die Leistungsmotivation und die Wahrnehmung anderer Personen (eine Eigenschaft, die als „Objektbezug" bezeichnet wird). Häufig jedoch schneiden Personen, denen solch ein TAT eine hohe Leistungsmotivation bescheinigt, in echten Leistungstests schlecht ab. Offensichtlich erlaubt der TAT derzeit nur begrenzt, Verhalten vorherzusagen. Im Übrigen fehlen den Verfahren Normwerte, daher sind sie für den Einsatz außerhalb der Forschung ohnehin noch nicht geeignet.

Anders als beim Rorschach-Test und beim TAT, die fertige Bilder verwenden, sollen die Probanden bei einem dritten projektiven Ansatz diese selbst malen – Menschen, Häuser oder Bäume. Kliniker deuten dann in der Regel spezifische „Kennzeichen" wie Merkmale des Körpers oder der Kleidung einer Zeichnung als Ausdruck bestimmter Facetten der Persönlichkeit oder gar psychischer Störungen. Große Augen assoziieren sie beispielsweise mit Paranoia, lange Krawatten mit sexueller Aggression, Gesichter ohne Augen, Nase oder Mund als Hinweis auf eine Depression.

Auch hier besteht Anlass zu erheblichen Bedenken. Einigen Studien zufolge stimmen die Bewertungen weit gehend überein, andere kommen zum gegenteiligen Schluss. Schlimmer noch, es gibt keinen eindeutigen Beleg für die Gültigkeit der kennzeichengestützten Interpretation; mit anderen Worten, die Kliniker haben keinerlei Begründung für ihre Schlussfolgerungen und Diagnosen. Zum Beispiel fehlen widerspruchsfreie Belege für die Annahme, Darstellungen von Zungen oder Genitalien in Kinderbildern lieferten einen Hinweis auf sexuellen Missbrauch. Nachweisbar scheint lediglich, dass Personen, die Menschen nur sehr schlecht zu zeichnen vermögen, eine etwas erhöhte Rate an psychischen Störungen aufweisen. Aber auch dieses Ergebnis ist sehr kritisch zu bewerten, denn es gibt schlichtweg auch gesunde, aber künstlerisch nicht besonders begabte Menschen, die dann zu Unrecht in ein falsches Licht geraten.

Sichere Diagnose oder bedenkliches Verfahren?

Manche Befürworter argumentieren, es bedürfe eben praktischer Erfahrung, um solche Mal-Tests auszuwerten, doch auch zu diesem Votum gibt es eine kritische Untersuchung: Bei diesem Versuch gelang es Studenten besser, psychische Normalität von Anormalität anhand eines „Zeichne-einen-Menschen"-Tests zu unterscheiden, als so genannten Experten.

Bessere Ergebnisse liefern Auswertungsverfahren, die nicht ein einzelnes Kennzeichen einer Zeichnung mit einem isolierten Persönlichkeitsmerkmal in Bezug setzen, sondern viele Aspekte zu einem allgemeinen Eindruck der Anpassungsfähigkeit der Persönlichkeit kombinieren. Mit einem solchen globalen Ansatz vermochten Psychologen beispielsweise in einer Untersuchung von 52 Kindern die normalen von solchen mit affektiven Störungen oder Angststörungen zu unterscheiden. In einer anderen Studie gelang es, normale Kinder und Heranwachsende von aggressiven oder extrem aufsässigen Altersgenossen abzugrenzen.

Unsere Metastudie unterstützt also den Vorwurf, Rorschach-Test, TAT und Zeichen-Test, so wie sie normalerweise angewandt werden, seien nur sehr eingeschränkt sinnvoll. Dasselbe gilt für viele andere projektive Verfahren, die wir hier

---

Spektrum-Interview

„Ich möchte gern ein Tiger sein, weil ..."

Zur Problematik projektiver Tests befragte „Spektrum der Wissenschaft" Prof. Dr. Manfred Amelang vom Lehrstuhl für Differenzielle Psychologie und Psychologische Diagnostik der Universität Heidelberg.

Spektrum der Wissenschaft: *Herr Professor Amelang, wer sich heutzutage um eine Führungsposition bewirbt, findet sich oft vor einer Reihe von Tintenklecksen wieder. Warum setzen viele Betriebspsychologen auf den Rorschach-Test oder vergleichbare Verfahren?*

Amelang: Vor allem, weil die Grundidee so unmittelbar einleuchtet. Bei so wenigen Vorgaben der Aufgabenstellung muss – so die Theorie - das Unbewusste doch einfach aktiv werden, die Antworten und Reaktionen spiegeln nach Ansicht der Protagonisten deshalb die seelischen Abgründe des Bewerbers. Zudem kann der sich auch kaum auf den Test einstellen, sofern er ihn nicht schon kennt. Fragt man ihn hingegen direkt – sehr vereinfacht etwa „Sind Sie aggressiv? Sind Sie motiviert?" – kann sich der Bewerber natürlich viel besser ins rechte Licht setzen.

Spektrum: *In den Vereinigten Staaten sind diese Tests nun in Verruf geraten. Eine Metastudie legt den Schluss nahe, sie seien wenig verlässlich und nicht valide. Gibt es in Deutschland ähnliche Vorbehalte?*

Amelang: Nun, ich würde sagen, die gibt es weltweit. Und sie sind keineswegs neu. Schon Anfang der sechziger Jahre publizierte der Psychologe Hans Hörmann von der Ruhr-Universität Bochum eine exzellente Analyse zu diesem Thema, der aus meiner Sicht auch heute nichts hinzuzufügen ist. Seine Metastudie verwertete übrigens Untersuchungen, die teilweise noch zwanzig oder vierzig Jahre älter waren.

Spektrum: *Dann ist es allerdings kaum zu verstehen, warum diese Verfahren noch in Gebrauch sind, zumindest wohl in den Vereinigten Staaten?*

Amelang: Die Idee ist halt so vielversprechend. Sie stammt letztlich aus der Psychoanalyse. Rorschach hat seinen Test entwickelt, um ihn in der Therapie einzusetzen. Analytiker machen ja im Grunde auch nichts anderes, als aus den Äußerungen ihrer Patienten ein Bild der

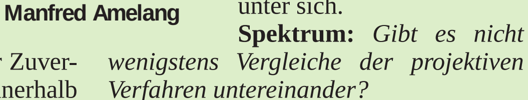
Persönlichkeit zusammenzusetzen. Projektive Tests sollen das Verfahren sozusagen abkürzen.

Spektrum: *Und was stimmt an dieser Idee nicht?*

Amelang: In der Therapie genügt es, dass sich der Patient in dem entworfenen Bild wiedererkennt, sich verstehen lernt und der Prozess so heilsam wirkt. Am Ende eines Persönlichkeitstests sollen aber objektive Informationen für Dritte stehen. Und das gelingt nicht, und dies ist in den Verfahren angelegt.

Spektrum: *Projektive Tests sind per se nicht zuverlässig?*

Amelang: Richtig, denn Zuverlässigkeit erfordert, dass bei einer Testwiederholung die gleichen Ergebnisse herauskommen. Projektive Verfahren funktionieren aber nur dann, wenn der Proband sie noch nicht kennt. Ein weiteres Kriterium für Zuverlässigkeit wäre, die Konsistenz innerhalb einer Untersuchung durch vergleichbare Items zu erheben. Das kennen Sie sicher von Fragebögen: Einmal heißt es „Fühlen Sie sich zu dick?“ und etwas später „Fühlen Sie sich zu dünn?“. Wenn Sie beide Male „Ja“ ankreuzen, sind Ihre Antworten vermutlich insgesamt nicht viel wert. Aber so ein Konsistenz-Check klappt auch nicht, denn die Items der projektiven Tests – also beispielsweise die verschiedenen Tintenklecksbilder – sind viel zu heterogen.



Manfred Amelang

Spektrum: *Sie erwähnten ein zweites Kriterium?*

Amelang: Die Validität, also die Gewähr, dass die Verfahren wirklich das messen, was sie vorgeben zu tun. Leider genügen die Verfahren auch hier nicht den strengen Kriterien der wissenschaftlichen Diagnostik. Dazu müsste man die Ergebnisse mit denen anderer Tests, die das Gleiche messen und nachweislich valide sind, anhand von Indikatoren vergleichen können. Weil die projektiven Verfahren aber die einzigen sind, die für sich reklamieren, das Unbewusste zu messen, ist ein solcher Vergleich nicht möglich. So bleiben die Protagonisten unter sich.

Spektrum: *Gibt es nicht wenigstens Vergleiche der projektiven Verfahren untereinander?*

Amelang: Selbst dazu sind die einzelnen Tests zu unterschiedlich. Nein, es hilft nichts, projektive Verfahren stehen außerhalb der wissenschaftlichen Kriterien psychologischer Diagnostik.

Spektrum: *Ketzerisch gefragt – könnte das nicht ein Problem der Wissenschaft sein? Könnten diese Verfahren nicht trotzdem funktionieren, auch wenn es keinerlei Möglichkeit gibt, das zu beweisen?*

Amelang: Das wäre schön, aber dazu fehlt noch viel. Beispielsweise gibt es einfach zu viel Subjektivität. Legen Sie zwei unabhängigen Auswertern die gleichen Antworten und Reaktionen vor, und Sie erhalten mit einer Chance von fünfzig Prozent verschiedene Interpretationen. Und das ist kein Wunder, denn diese Antworten sind ja auch nicht eindeutig und sofort interpretierbar. Wenn ich etwa ein Kind bitte, den Satz „Ich möchte gern ein Tiger sein, weil ...“ zu vervollständigen, und es antwortet: „Weil ein Tiger so gut beißen kann!“, dann ist das natürlich ein Hinweis auf Aggression. Aber ist das ein für das Kind gesundes Potenzial? Hat es ein Problem damit, aggressiv zu sein? Oder wünschte es sich nur, es wäre aggressiver, um sich in der Klasse besser durchzusetzen? Oder, oder, oder.

Spektrum: *Was bleibt denn dann für einen Psychologen übrig, um zum Beispiel das soziale Vermögen von Jugendlichen einzuschätzen?*

Amelang: Es gibt für solche Fragestellungen leider keine validen und reliablen Tests. Gespräche, Rollenspiele und Befragungen von Angehörigen lassen sich nicht durch Rorschach oder TAT ersetzen.

Das Interview führte **Klaus-Dieter Linsmeier***, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

nicht besprochen haben (siehe dazu den Kasten auf Seite 75). Wir fanden außerdem, dass die Verfahren, selbst wenn sie tatsächlich messen, was sie zu messen beanspruchen, kaum mehr Informationen liefern als kostengünstigere, eher praktisch orientierte Tests. So lassen sich durch klar umrissene Fragen wie „Ich denke oft daran, mich selbst zu verletzen – ja oder nein?“ Diagnosen ebenso sicher, dafür aber schneller treffen.

Einige Fachleute widersprechen allerdings unseren Schlussfolgerungen. Sie argumentieren, projektive Verfahren hätten eine lange Erfolgsgeschichte und könnten, bei richtiger Anwendung, über die Selbstberichte der Probanden hinaus ein Bild ihres innersten Denkens und Fühlens vermitteln. Andere Kritiker bemängeln, wir hätten negative Ergebnisse überbetont sowie die positiven ausgelassen.

Dennoch vertrauen wir auf unsere Schlussfolgerungen, die unseres Erachtens sogar noch ein zu rosiges Bild zeichnen: Wissenschaftliche Zeitschriften veröffentlichen nämlich bekanntermaßen eher Berichte, in denen nachgewiesen wird, dass ein Verfahren funktioniert. Infolgedessen bleiben negative Daten und Studien mit nicht-signifikanten Ergebnissen eher in der Schublade.

Wir halten es deshalb für bedenklich, dass Psychologen projektive Verfahren oft bei Fragestellungen einsetzen, in denen ihr Wert nicht wissenschaftlich belegt ist. Allzu viel Schaden entsteht, wenn falsche Diagnosen Therapiepläne, Sorgerechtsentscheidungen oder Strafgerichtsurteile beeinflussen. ■

Scott O. Lilienfeld, James M. Wood *und* **Howard N. Garb** *erforschen psychologische Beurteilungsverfahren und erstellten vor kurzem eine Übersichtsstudie über projektive Verfahren, die von der American Psychological Society veröffentlicht wurde. Lilienfeld und Wood sind Associate Professors im Fachbereich Psychologie der Emory-Universität beziehungsweise der Universität Texas in El Paso. Garb arbeitet als klinischer Psychologe im Pittsburgh Veterans Administration Health Care System und an der Universität Pittsburgh.*

Literaturhinweise

The Scientific Status of Projective Techniques. Von Scott O. Lilienfeld, James M. Wood und Howard N. Garb. Verfügbar auf der Website: www. psychologicalscience. org/ newsresearch/ publications/ journals/ pspi1_ 2. html

Projective Measures of Personality and Psychopathology: How Well Do They Work? Von Scott O. Lilienfeld in: Skeptical Inquirer, Bd. 23, Nr. 5, Seite 32; September/Oktober 1999.

Evocative Images: The Thematic Apperception Test and the Art of Projection. Von Lon Gieser und Morris I. Stein (Hg.). American Psychological Association, 1999.

Auf dem Weg zum Billiarden-Rechner

Große wissenschaftliche Probleme erfordern Computer mit der tausendfachen Leistung der schnellsten heutigen Maschinen. In einer speziellen Initiative versuchen Wissenschaftler verschiedenster Richtungen diese Schwelle zu erreichen.

Von Thomas Sterling

Die Supercomputer von heute sind zu langsam für die Wissenschaft von morgen, und das trotz der rasanten technischen Entwicklung. Wesentliche Fortschritte in Klimaforschung, Medizin, Biowissenschaften, Kernfusionstechnik, Militärtechnik, Nanotechnologie und Wirtschaft warten auf Zahlenfresser, die tausendmal so schnell sind wie die besten heutigen Rechner (Kasten Seite 80/81).

Bei jedem der großen Probleme, die zur Lösung anstehen, geht es darum, das Verhalten eines ungeheuer komplexen Systems so getreu wie möglich nachzubilden, und das über lange Zeiten hinweg. Heutige Supercomputer, die höchstens ein paar Billionen elementare Rechenakte pro Sekunde (einige 10^{12} *flops* oder Teraflops, siehe Glossar) ausführen können, sind damit überfordert. So würde das größte derzeit existierende System hundert Jahre benötigen, um nur die blitzschnelle natürliche Faltung eines Proteins nachzuvollziehen – einen Vorgang, um dessen Verständnis schon lange heftig gerungen wird. Analysen dieser Art erfordern „Hypercomputer“, Geräte, die mindestens im Petaflops-Bereich arbeiten, das heißt mehr als einer Billiarde (10^{15}) arithmetischen Operationen pro Sekunde erledigen können.

Heutige Maschinen sind nicht nur zu langsam, sondern auch zu teuer. Die Computer „ASCI Blue“ (*Accelerated Strategic Computing Initiative*), die für die mittlerweile verbotenen Kernwaffentests Ersatz schaffen sollen, leisten drei Teraflops und kosten pro Stück ungefähr 120 Millionen Dollar. Das ist ein Preis-Leistungsverhältnis von vierzig Dollar pro theoretisch erreichbarem Megaflops (Millionen *flops*); damit verglichen ist ein PC der Spitzenklasse um mehr als das Zehnfache günstiger. Dazu kommen die laufenden Kosten: Allein die Stromrechnung kann ohne weiteres über eine Million Dollar pro Jahr ausmachen, die Gebäudemiete für die sperrigen Kästen (Bild unten) ist erheblich, und die hoch spezialisierten Programmierer sind auch nicht billig.



Die drei Teraflops (3×10^{12} Rechenoperationen pro Sekunde) des Computers „ASCI Blue“ erfordern eine beträchtliche Stellfläche.

Umso schlimmer ist es, dass die Geräte ihre teuer bezahlten Rechenfähigkeiten nur zu einem geringen Teil nutzen. Es ist durchaus üblich, dass von den zahlreichen Prozessoren eines Supercomputers im zeitlichen Mittel nur jeder vierte arbeitet; bei gewissen Anwendungen sinkt der Wirkungsgrad gar bis auf ein Prozent der Spitzenleistung ab.

Eine neue Klasse von Computern eröffnet die Aussicht auf die hundertfache Leistung gegenwärtiger Supersysteme bei gleichem Preis, Strom- und Platzbedarf. Weitere Verbesserungen könnten die Geräte für den Bereich jenseits der Petaflops tauglich machen – mehr als das Tausendfache der heutigen Spitzenleistung. Für dieses Ziel haben sich Angehörige vieler Institutionen und Fachrichtungen zusammengetan und das Konzept eines Computers namens HTMT (*hybrid technology multithreaded system*) entwickelt, das eine Reihe moderner Techniken für Prozessoren, Speicher und Kommunikation zusammenführt, ihre Stärken bündelt und ihre Schwächen kompensiert. Die Grundlagen von HTMT wurden mit finanzieller Unterstützung der Nasa, des Geheimdienstes National Security Agency, der Forschungsförderungsanstalt National Science Foundation und der Forschungsagentur des amerikanischen Verteidigungsministeriums (*Defense Advanced Research Projects Agency*, DARPA) erarbeitet; die endgültige Realisierung wartet noch auf weitere staatliche Mittel.

Herkömmliche Schnellrechner

Bisher hat die Supercomputerindustrie wesentliche Fortschritte erzielt, indem sie die einzelnen Komponenten ihrer Rechner ebenso wie deren Zusammensetzung (die „Architektur“) auf die Lösung spezieller Probleme ausrichtete. Im Gegensatz zum explosiven Wachstum anderer Computermärkte mussten daher die extrem hohen Entwicklungskosten von einem relativ kleinen Kundenkreis getragen werden. Durch die daraus resultierenden exorbitanten Preise hielt sich die Kaufbereitschaft industrieller wie staatlicher Abnehmer in engen Grenzen, was wiederum die Entwicklungsanstrengungen der Hersteller dämpfte – eine klassische ökonomische Abwärtsspirale.

Immerhin wurden verschiedene Entwicklungslinien verfolgt, insbesondere der Vektorcomputer, in dem zahlreiche kleine Recheneinheiten im Gleichtakt dieselbe elementare Operation mit verschiedenen Daten durchführen, und der Parallelrechner, in dem viele Prozessoren weit gehend unabhängig voneinander größere Stücke der Gesamtarbeit erledigen (siehe Spektrum der Wissenschaft, Dossier „Rechnerarchitekturen“). Gleichwohl blieben die Kosten hoch und der Wirkungsgrad gering.



OLIVIER LAUDE

In den letzten zwei bis drei Jahren wurden hochgradig parallele Universalcomputer mit mehr als einem Teraflops theoretischer Maximalleistung entwickelt. Bei der Anwendung auf konkrete Probleme wird davon jedoch häufig nur ein geringer Teil genutzt. Etliche Fachleute sehen wenig Chancen, den Wirkungsgrad zu erhöhen, und ziehen daraus die einzig sinnvolle Konsequenz, die Komponenten billiger zu machen: An die Stelle der teuren Spezialprozessoren verbindet man billige Standard-Computer zu einem Netz (einem *commodity cluster*). Das zahlt sich aus, trotz des erhöhten Programmieraufwands und obgleich die Kommunikation über das Netz weitaus schwerfälliger abläuft als im Inneren eines Parallelrechners.

In einer anderen Entwicklungslinie arbeitet man seit Mitte der neunziger Jahre mit einer ganzen Palette von Konzepten (Kasten Seite 82) an petaflopsfähigen Systemen. Alle diese Ansätze sind so weit gediehen, dass sie bei ausreichender Finanzierung noch innerhalb dieses Jahrzehnts realisiert werden können. HTMT ist einer von ihnen, der sich durch besonders breite Anwendbarkeit auszeichnet. Das Konzept vereint ein breites Spektrum neuester Techniken in einem einzigen flexiblen und optimierten System: superschnelle Prozessoren, Datentransfer mit hohem Durchsatz, Speichermedien mit höchster Dichte und weitere, kurz vor der Einsatzreife stehende Techniken in einer dynamischen und flexiblen Architektur.

Unabhängig vom gewählten Ansatz wird jede Entwicklung eines Trans-Petaflops-Computers an drei Kriterien gemessen werden:

➤ theoretische Maximalleistung (*peak performance*): Bei beschränktem Preis, Stromverbrauch und Volumen müssen hinreichend viele hinreichend leistungsfähige Prozessoren, Speicher und Kommunikationsleitungen so zusammengeschaltet werden, dass die geforderte Leistung im Prinzip erreichbar ist;

➤ Wirkungsgrad: Ein möglichst großer Teil dieser theoretischen Leistung muss der Lösung des Problems auch zugute kommen. Dazu sind die üblichen leis- ▶

tungsmindernden Effekte zurückzudrängen: Anforderungen an Daten aus dem Speicher stehen Schlange, Kommunikationsleitungen sind zu häufig besetzt, Prozessoren sind wegen schlechter Organisation untätig, der Koordinationsaufwand nimmt zu viel Leistung in Anspruch.

➤ Nutzbarkeit (*usability*): ein etwas willkürliches Kriterium, das wünschenswerte Eigenschaften wie universelle Verwendbarkeit, leichte Programmierbarkeit und hohe Verfügbarkeit umfasst.

Supraleitende Prozessoren

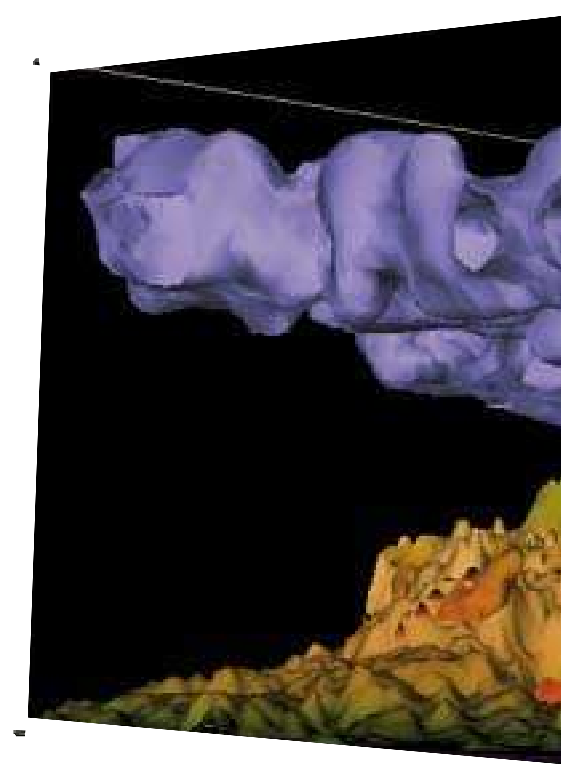
In den letzten zehn Jahren war CMOS (*complementary metal oxide semiconductors*) die dominante Technik für Logikschaltkreise. CMOS-Prozessoren bieten hohe Rechenleistung bei geringem Stromverbrauch; der viel beschriebene exponentielle Anstieg der Packungsdichte für Bauteile basiert auf dieser Halbleitertechnik. Aber die schnellsten der Welt sind sie nicht. Dieser Titel gebührt einer Technik, die auf vollkommen anderen physikalischen Prinzipien beruht: Supraleiter.

Wie zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckt wurde, leiten manche Materialien bei extrem niedrigen Temperaturen den elektrischen Strom ohne Widerstand. Im Prinzip kann ein Strom in einer Schleife aus supraleitendem Draht auf ewig fließen. Wichtiger ist jedoch, dass in solchen Bauteilen quantenmechanische Effekte makroskopischer Größenordnung auftreten. In den frühen sechziger Jahren wurde ein nichtlinearer, auf dem Prinzip der Supraleitung beruhender Schalter entwickelt, der so genannte Josephson-Kontakt (*Josephson junction*), der extrem schnell von einem Schaltzustand in den anderen übergehen kann.

Auf diesem Prinzip basiert der supraleitende Logikprozessor von HTMT. Seine Elemente sind winzige Drahtschleifen, die so genannten Squids, die im Prinzip aus zwei gekoppelten Josephson-Kontakten bestehen. Ein Squid speichert Information in Form diskreter Stromstärkeniveaus. Die Nullen und Einsen der digitalen Informationsverarbeitung werden also in diesen „schnellen Stromquanten-Gattern“ (*rapid single flux quantum gates, RSFQ-gates*) durch diskrete Ströme statt, wie üblich, durch diskrete Spannungen repräsentiert. Werden diese Elemente auf 4 Kelvin abgekühlt, können sie mit Taktfrequenzen von über 770 Gigahertz arbeiten: schneller als jeder je gebaute Schaltkreis und rund hundertmal so schnell wie die konventionelle CMOS-Logik.

Ein Prozessor in der rasch heranreifenden RSFQ-Technik wird eine Leistung von rund 100 bis 200 Gigaflops erbringen, im Gegensatz zu einigen wenigen Gigaflops bei CMOS-Prozessoren. Eine Rechenarbeit ist also in derselben Zeit mit weitaus weniger Prozessoren zu erledigen, was den Aufwand für die Parallelisierung – die Zerlegung der Arbeit in Teilaufgaben und das Zusammenspiel der Prozessoren – drastisch reduziert. Darüber hinaus erlaubt die Technik eine weitere Miniaturisierung, einerseits weil die elementaren Bauteile sehr klein sind, andererseits weil wegen der diskreten Natur der magnetischen Flussquanten das Übersprechen – Störsignale von einer Datenleitung zur benachbarten – weniger problematisch ist. Kleine Größe wiederum bringt Ersparnisse beim Strom- und Platzbedarf ebenso wie beim Anschaffungspreis.

Ein Sturm über dem Gelben Meer vor der chinesischen Küste, modelliert mit Software, die an der Staatsuniversität von Pennsylvania und dem Nationalen Zentrum für Atmosphärenforschung entwickelt wurde. Unter einer Decke



Aus diesen superschnellen Prozessoren versucht HTMT dann das Beste herauszuholen, das heißt, sie möglichst mit nichts anderem als Rechnen zu beschäftigen, und das möglichst die ganze Zeit. In herkömmlichen Anlagen wie den genannten Commodity Clusters zerlegt man die Arbeit in relativ große Teilstücke und weist jedes Teilstück einem entsprechend

Haupteinsatzgebiete für Hypercomputer

Viele Probleme von großer gesellschaftlicher und politischer Bedeutung warten auf Lösungen, die nur mit Höchstleistungs-Computern zu finden sind. Eine Rechengeschwindigkeit von mehr als 10^{15} Operationen pro Sekunde (*trans-petaflops*) ist gefragt.

➤ Klimamodellierung:

Vielleicht das kritischste Problem der Menscheit ist die kurz- wie langfristige Wetter- und Klimavorhersage. Ein Transpetaflops-Computer könnte riesige Mengen von Satellitendaten zu einer detaillierten Wetterkarte zusammenfassen und auf dieser Basis die chaotischen Bewegungen in unserer Atmosphäre – und damit das Wetter – mit bisher ungeahnter Präzision vorausberechnen.

➤ Kontrollierte Kernfusion:

Sie wäre die Lösung für alle Energieprobleme der Welt ebenso wie ein Antriebsmittel für interstellare Raumfahrzeuge – wenn man sie beherrschen würde. Das jedoch gelingt seit Jahrzehnten nicht, wegen der Komplexität der thermischen, elektromagnetischen und nuklearen Reaktionen innerhalb eines Fusionsreaktors. Transpetaflops-Computer würden das Geschehen mit ausreichender Präzision simulieren und damit die Konstruktion von Reaktoren voranbringen.

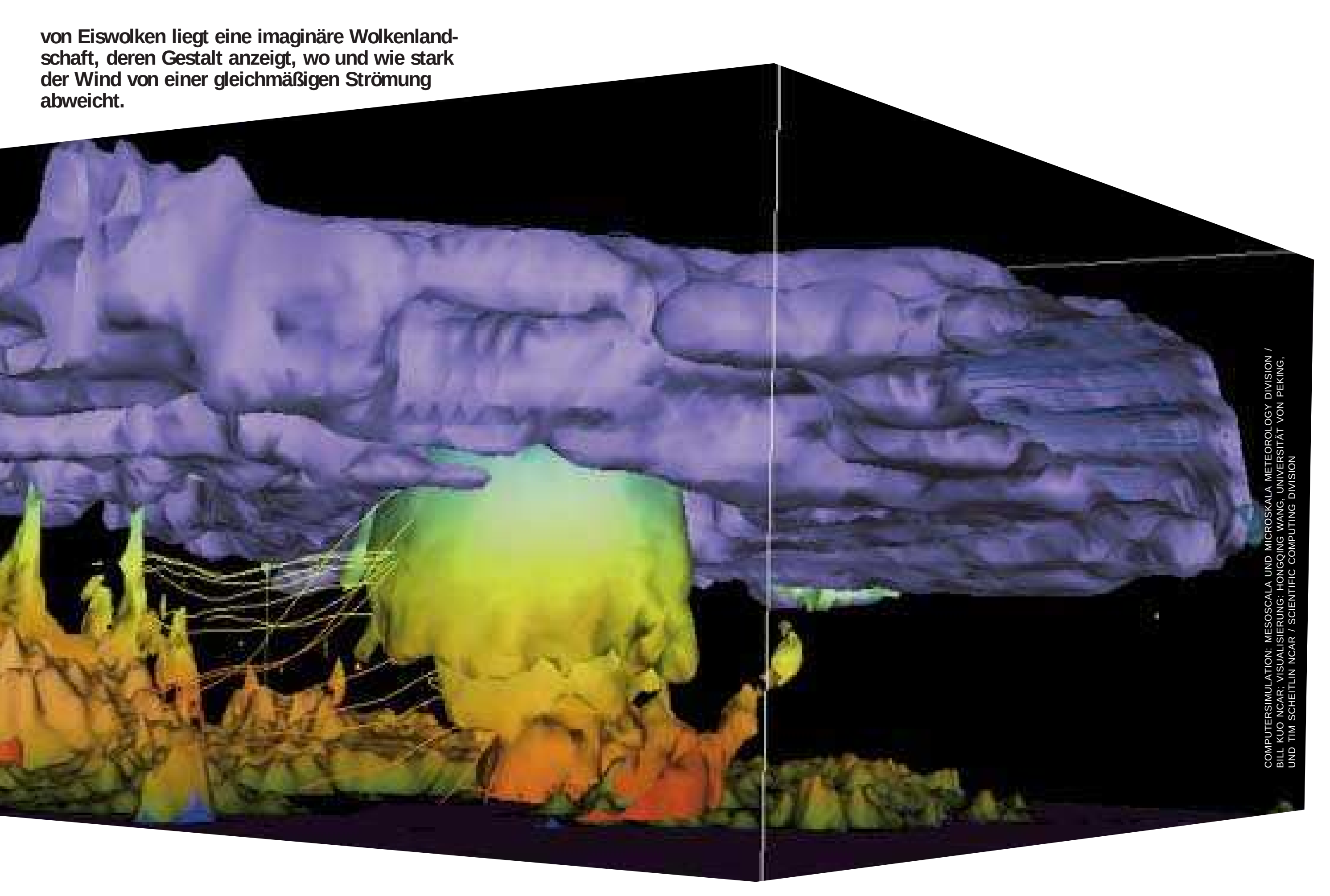
➤ Medizin und Biowissenschaften:

Die Pharmaforschung könnte in die Lage kommen, Medikamente so schnell zu entwickeln, wie die Krankheitserreger mutieren, und damit vielleicht sogar dem extrem schnell veränderlichen Aids-Virus beikommen. Das jedoch erfordert Analysen auf molekularer Ebene, wie etwa die der Faltung gewisser Proteine.

➤ Militärtechnik:

Nach dem Kernwaffenteststopp könnten Transpetaflops-Computer das Verhalten der Waffen des strategischen Kernwaffenarsenals simulieren, um sie einsatzbereit

von Eiswolken liegt eine imaginäre Wolkenlandschaft, deren Gestalt anzeigt, wo und wie stark der Wind von einer gleichmäßigen Strömung abweicht.



COMPUTERSIMULATION: MESOSCALA UND MICROSKALA METEOROLOGY DIVISION / BILL KUO NCAR; VISUALISIERUNG: HONGQING WANG, UNIVERSITÄT VON PEKING, UND TIM SCHEITLIN NCAR / SCIENTIFIC COMPUTING DIVISION

großen „Rechenknoten“ (Einzel- oder Parallelrechner) zu. Oftmals muss ein Knoten auf Ergebnisse von einem anderen warten, und wenn nicht ein menschlicher Operator die Teilaufgaben sehr sorgfältig zuweist, sind stets einige Knoten untätig. Spezielle Software, welche die Aufgaben des Operators übernimmt, kann ihrerseits Prozessorleistung in erheblichem Umfang in Anspruch nehmen.

HTMT löst das Problem, indem es das Zusammenspiel zwischen Prozessor und Speicher auf den Kopf stellt. In konventionellen Parallelrechnern bestimmen die Prozessoren, was die „dummen“ Speichereinheiten zu tun haben; im Gegensatz dazu ist das Speichersystem von HTMT „intelligent“ und regiert die Prozessoren.

Warten auf Daten aus dem Speicher – dieses „Latenzproblem“ ist es, das die Prozessoren beim Rechnen am meisten aufhält. Bis eine Information aus dem Arbeitsspeicher eintrifft, können 200 Nanosekunden vergehen. In dieser Zeit könnte ein supraleitender RSFQ-Chip 100000 Rechenoperationen ausführen. HTMT bietet für dieses Problem zunächst zwei Lösungen an:

➤ vielfädiges Rechnen (*multithreading*, vergleiche Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 26): Anstatt untätig auf Daten zu warten, wendet sich der Prozessor einer anderen Aufgabe zu, für welche die Daten bereits vorliegen. Das erfordert, dass es diese andere Aufgabe gibt und der Prozessor rasch von einer zur anderen wechseln kann. Die verschiedenen Aufgaben (Befehlsfolgen) heißen „Fäden“ (*threads*); durch spezielle Techniken wird in HTMT erreicht, dass der Prozessor in einem einzigen Taktzyklus den einen Faden ablegen und den anderen aufgreifen kann, um daran weiterzuspinnen. ▶

zu halten. Militärisch von entscheidender Bedeutung ist auch die schnelle Entschlüsselung immer komplexer werdender Geheimcodes.

➤ Wirtschaft und Finanzwesen:

Die Auswertung enormer Mengen von wirtschaftlichen Daten und Statistiken wird eine bessere Simulation wirtschaftlicher Systeme gestatten.

➤ Nanotechnik:

Mit dem Schrumpfen der elektronischen Bauteile auf atomare Größenordnungen werden quantenmechanische Effekte wirksam, sodass Chipdesigner nicht mehr mit gemittelten physikalischen Größen arbeiten können.

➤ Spitzentechnologien:

Superschnelle Computer werden zur Simulation des Verhaltens neuer Materialien auf der mikroskopischen Größenskala benötigt werden. Bei der Entwicklung neuer Flugzeuge und anderer komplexer technischer Systeme wird man ebenfalls aus diesen detaillierten Modellen Nutzen ziehen.

➤ Astronomie:

Um unsere Galaxis mit ihren 100 Milliarden Sternen richtig zu modellieren, ist das komplexe Verhalten der interstellaren Materie und insbesondere der in ihr enthaltenen schwereren Moleküle zu analysieren (Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 49).

➤ Prozessor im Speicher (*processor in memory*, PIM). Seit ein paar Jahren ist es möglich, CMOS-Logikschaltkreise und dynamischen Speicher (*dynamic random access memory*, DRAM) auf demselben Siliziumchip zu integrieren. Diese billigen Geräte übernehmen den Datentransport zwischen den verschiedenen Speichern und entlasten damit die supraleitenden Prozessoren, die sich stattdessen aufs Rechnen konzentrieren können. Diese Hilfsaufgaben umfassen so weit gehende Tätigkeiten wie Daten von weit verstreuten Stellen zusammenzuholen oder Ergebnisse an die richtigen Stellen zu verstreuen (*data gather* und *data scatter*).

Diese beiden Konzepte sind zwar innovativ, aber für sich noch nicht geeignet, die große Latenzlücke zu überbrücken. Eine revolutionäre Neuerung muss hinzukommen: die *percolation technique* („Blubbertechnik“). Ein HTMT-Rechner wird gewissermaßen aus fünf Schichten bestehen. In der obersten Schicht sitzen die Prozessoren, darunter vier Schichten von Speichern, jede Schicht in einer anderen Technik ausgeführt. Je weiter oben ein Speicher sitzt, desto schneller ist der Zugriff, desto geringer allerdings auch seine Kapazität. Alle benötigten Daten sitzen im Prinzip in der untersten, geräumigsten Speicherschicht und müssen wie Blasen in einer Flüssigkeit zum Prozessor nach oben steigen.

Daten blubbern zum Prozessor

Diesen Aufstieg regeln die PIMs, die in jedem Speicher stecken. Und zwar warten sie gar nicht erst darauf, dass ein Prozessor Daten anfordert. Vielmehr machen sie aus vielen kleinen Blasen wenige große: Sie fügen auf dem Weg nach oben selbsttätig alle Daten, die für einen Rechenvorgang benötigt werden, samt den Rechenbefehlen selbst und Informationen über den Stand der Bearbeitung zusammen. Die Gesamtheit dieser Informationen (ein *context*) landet dann gebündelt beim Prozessor, der sie nur noch abzuarbeiten braucht, ohne sich mit Datenbeschaffung aufzuhalten. Die Ergebnisse der Arbeit werden von den PIMs in der Speicherhierarchie abwärts und schließlich dorthin geschafft, wo sie benötigt werden.

Es bleibt das dritte große Kriterium für Transpetaflops-Computer zu erfüllen: die Nutzbarkeit. Das System muss zur Lösung eines breiten Spektrums von Aufgaben geeignet, leicht programmierbar und möglichst ohne Ausfälle permanent verfügbar sein. HTMT versucht diese Forderungen auf verschiedenen Wegen zu erfüllen.

Einer dieser Wege ist der gemeinsam genutzte Speicher (*shared memory*). Üblicherweise hat jeder Prozessor einen eigenen Speicher, auf den er ohne Umstände zugreifen kann, während er Daten aus fremden Speichern nur auf Anforderung erhält; diese Anforderung muss explizit als Befehl in dem Programm enthalten sein, das der Prozessor ausführt. Bei gemeinsam genutztem ▶

Fünf andere Wege zum ultraschnellen Rechnen

Eine Möglichkeit, einen Computer mit mehr als 10^{15} Rechenoperationen pro Sekunde herzustellen, ist in dem vorliegenden Artikel beschrieben. Diese Tabelle führt fünf weitere Ansätze auf.

Name	Verfahren	Beispiel	am besten geeignet für
1 spezialisierte Architektur, zum Beispiel systolischer Array	Eigens für ein zu lösendes Problem entwickelte Hardware und Software. Beim systolischen Array ist vorab festgelegt, welcher Prozessor wann mit welchem anderen kommuniziert: keine Wartezeiten, keine Schaltverzögerung.	Projekt Grape (Universität Tokio)	Vielkörper-Systeme mit extrem großen Teilchenzahlen, insbesondere Sternhaufen; Bioinformatik
2 zelluläre Automaten	Maschine mit endlich vielen Zuständen, in welcher eine große Anzahl relativ einfacher Rechenzellen in einer zwei- oder dreidimensionalen Matrix im Gleichtakt arbeiten. Die Aktion einer Zelle hängt von ihrem Zustand und dem ihrer unmittelbaren Nachbarn ab.	nie vollständig implementiert	numerische Strömungsmechanik, Simulation von Diffusionsprozessen
3 Prozessor im Speicher (*processor in memory*, PIM)	Auf ein und demselben Chip ist allerlei Prozessor- und Speicherkapazität versammelt. Das System „sieht“ alle Inhalte des Arbeitsspeichers gleichzeitig. Der begrenzte Vorrat an Speicherinhalten ist in jedem Rechentakt ohne Zeitverzug vollständig verfügbar.	IRAM (Universität von Kalifornien in Berkeley), Blue Gene (IBM)	Bildverarbeitung, Datenverschlüsselung, schnelle Datenbanksuche, Modellierung von Proteinfaltung
4 Beowulf- oder Cluster-Architekturen	Viele preiswerte Standardprozessoren sind mit einem dichten Netz an Leitungen hoher Bandbreite verbunden.	GigAssembler (International Human Genome Sequencing Consortium)	vielfältige Anwendungen, Entzifferung des menschlichen Genmaterials
5 verteiltes Rechnen	Verwendet die ungenutzten Taktzyklen der rund 500 Millionen ans Internet angeschlossenen PCs. Sein Nachteil ist die schwerfällige Kommunikation.	SETI@home (Absuchen kosmischer Funksignale nach Anzeichen außerirdischer Intelligenz	extrem große Monte-Carlo-Simulationen, Überwachung der Funktion des Internets




Ein Laserstrahl liest Daten aus einem holographischen Speichersystem (Versuchsaufbau im Almaden-Forschungszentrum der IBM in San Jose, Kalifornien).

OLIVIER LAUDE

Speicher dagegen kann jeder Prozessor jederzeit den gesamten Speicher „überblicken“. Eine Datenübertragung aus einem fernen Speicher muss zwar nach wie vor stattfinden, aber wenn ihr Zeitpunkt nicht mehr durch expliziten Befehl festgelegt ist, kann das System diese Arbeit umorganisieren, zum Beispiel mit Hilfe der Perkolationstechnik, und dadurch Latenzverluste vermeiden. Die dadurch gewonnene Flexibilität macht den Rechner zudem geeignet für eine größere Problemklasse.

Schließlich kommt das Konzept des gemeinsam genutzten Speichers der Denkweise der Anwender sehr entgegen. Einer Maschine zu sagen, was sie tun soll, ist schon schwer genug; es hilft dem Programmierer, wenn er ihr nicht auch noch erklären muss, wann und wo sie ihre Daten abholen soll. Zudem kann die Maschine diese Hilfsaufgaben in der Regel intern geschickter organisieren als der Programmierer mit einer expliziten Vorschrift.

Die Ausfallsicherheit wird dadurch erhöht, dass die Maschine durch die Verwendung leistungsstärkerer Komponenten Gleiches mit weniger Bauteilen leisten kann als eine herkömmliche.

Holographische Speicher

Eine weitere Innovation besteht aus Speichern in holographischer Technik. Diese Alternative zum üblichen Halbleiter-Direktzugriffs-Speicher wird in akademischen und industriellen Forschungslabors untersucht und verspricht überlegene Speicherdichte, geringen Stromverbrauch und geringe Kosten (Spektrum der Wissenschaft 1/1996, S. 50).

In einem holographischen Speicher sind große Datenmengen in einem lichtempfindlichen Material abgespeichert. Zwei verschiedene Techniken werden derzeit untersucht. In photorefraktiven Speichern wird in einem Material wie etwa Lithiumniobat ein Interferenzmuster aus einem datentragenden Laserstrahl und einem Referenzstrahl erzeugt (Bild oben). Dieses Muster enthält eine große Menge von Daten, die in einem Rechteck angeordnet sind. Über den elektrooptischen Effekt werden lokal elektrische Felder induziert, die ihrerseits ein Hologramm erzeugen. In ein und demselben Speichermedium sind viele verschiedene derartige Hologramme unabhängig voneinander ablegbar, indem man entweder den Einfallswinkel oder die Wellenlänge des Laserstrahls variiert.

Die zweite Technik heißt Spektrallochmethode. Auf Lichteinfall reagiert das Material nichtlinear durch Änderung seines Absorptionsspektrums. An jedem Punkt können durch Wahl verschiedener Wellenlängen viele Bits unabhängig voneinander abgespeichert werden.

Die photorefraktiven Methoden sind zur Zeit wesentlich weiter entwickelt. Auf lange Sicht hinaus könnten jedoch Spektrallochmethoden die höchsten Speicherdichten erzielen. Gegenwärtig haben holographische Speicher Zugriffszeiten im Millisekundenbereich: Bis das erste Bit aus einer großen Datenmenge eintrifft, dauert es ungefähr so lange wie bei einem herkömmlichen Sekundärspeicher, etwa einer Festplatte oder einer CD. Von neuen Techniken mit abstimmbaren Lasern oder Systemen von leicht versetzt zueinander

GLOSSAR

Prozessor („Verarbeiter“): Komponente eines Computers, die eine Folge von Befehlen (ein „Programm“) ausführt, und damit das Herzstück eines Computers. Kleinere Computer bis hin zu Workstations enthalten nur einen Prozessor (auf einem Mikrochip), Parallelrechner bis zu einigen zehntausend.

flops (*floating point operations per second*): Gleitkommaoperationen (Additionen oder Multiplikationen mit Kommaverschiebung) pro Sekunde, die Maßeinheit für die Rechengeschwindigkeit eines Computers. Üblich sind die Maßeinheiten Mega-(10^6), Giga-(10^9), Tera-(10^{12}) und neuerdings Peta-(10^{15})flops.

Josephson-Kontakt: zwei Supraleiter, die durch eine sehr dünne Isolierschicht getrennt sind. Ein Josephson-Kontakt kann binnen Picosekunden (10^{-12} Sekunden) vom normal- in den supraleitenden Zustand und zurück übergehen und ist deshalb als superschnelles Schaltelement geeignet.

Squid (*superconducting quantum interference device*): ein durch zwei Josephson-Kontakte unterbrochener Leiterring (Spektrum der Wissenschaft 10/1994, S. 58). In einem Squid können nur ganzzahlige Vielfache einer gewissen Grundstromstärke fließen, die „Stromquanten“ (*flux quanta*).

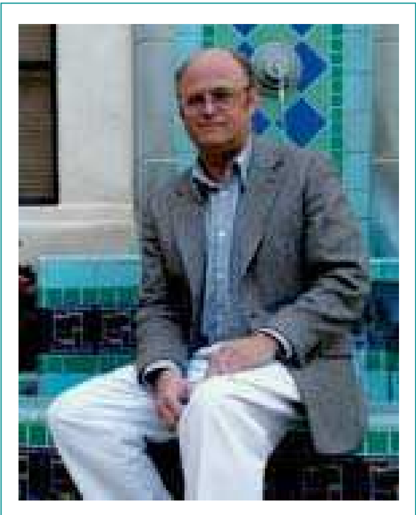
angeordneten Laserdioden erwartet man jedoch schon bald Zugriffszeiten um die zehn Mikrosekunden. Damit wären sie zwar immer noch um zwei Größenordnungen langsamer als Halbleiterspeicher, aber ihre Bandbreite – die Anzahl der übertragenen Bits pro Sekunde nach der Anfangswartezeit – wird vergleichbar derjenigen der Halbleiter sein und somit hundertmal so hoch wie bei einer Festplatte. Innerhalb der nächsten zehn Jahre erwartet man Speicher von der Größe eines Zuckerwürfels mit Kapazitäten von zehn Gigabit und mehr.

Optische Kommunikation

Die extrem schnellen supraleitenden Prozessoren und die Hochkapazitäts-Hologrammspeicher werden nicht mit Metallkabeln, sondern mit optischen Datenleitungen verbunden sein (Spektrum der Wissenschaft, Spezial „Schlüsseltechnologien“, S. 18). Ein Metalldraht kann zwar ohne weiteres Hunderte von Megabits pro Sekunde transportieren, und mit speziellen Techniken auch ein Gigabit (10^9 Bits). Um den Kommunikationsbedarf von Petaflops-Systemen zu befriedigen, wären jedoch einige zehn Millionen Drähte erforderlich! Dagegen kann ein modulierter Laser zehn Gigabit und mehr pro Sekunde durch eine konventionelle Glasfaser schicken.

Darüber hinaus kann man Signale verschiedener Wellenlängen (Farben) ohne gegenseitige Störung durch dieselbe Glasfaser übertragen. Für HTMT ist ein modernes optisches Übertragungssystem namens Wave Division Multiplex (Wellenteilungs-Multiplexer, WDM) vorgesehen, das pro Kanal mindestens den hundertfachen Datendurchsatz der besten Metalldrahtsysteme bieten soll. Die Anzahl der Wellenlängen, die zugleich in einem Kanal transportiert werden können, ist in den letzten Jahren auf hundert angestiegen und wird aller Wahrscheinlichkeit nach noch weiter anwachsen. Die Schalter, Sender und Empfänger, welche diese Datenströme zusammenfügen und nach ihrer Reise durch die Glasfaser wieder entkoppeln, werden schon bald fünfzig Millionen Schaltvorgänge pro Sekunde bewältigen; fortgeschrittene Versionen, an denen zurzeit noch experimentiert wird, lassen die zwanzigfache Schaltrate erwarten. Diese Kapazität würde ausreichen, um den enormen Datenfluss in einem Petaflops-Netzwerk zu bewältigen.

Diese Hypercomputer der nächsten Generation werden die Lösung globaler Probleme wie Treibhauseffekt, Epidemiologie und saubere Energieversorgung entscheidend voranbringen. Das Beratungskommittee für Informationstechnik des US-Präsidenten hat 1999 finanzielle Unterstützung für diese Art von Projekten nachdrücklich befürwortet. Die Realisierung eines Systems wie HTMT bedarf lediglich noch der Finanzierung. ■



Thomas Sterling *ist Wissenschaftlicher Direktor in der Abteilung für Hochleistungsrechnen am Jet Propulsion Laboratory der amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde Nasa und Fakultätsmitglied im Zentrum für fortgeschrittene Computerforschung des California Institute of Technology in Pasadena. Seit zwanzig Jahren forscht er über Hardware für Parallelrechner und Software für Hochleistungsrechnen. Seit 1994 ist er führendes Mitglied der amerikanischen Petaflops-Initiative; er ist der Leiter des in diesem Artikel beschriebenen Projekts HTMT.*

Literaturhinweise

Challenges of Future High-End Computing. Von David H. Bailey in: High Performance Computer Systems and Applications. Hrsg. von Jonathan Schaeffer. Kluwer, 1998. Im Web unter www.nersc.gov/~dhbailey/dhbpapers/future.pdf

Mix of Technologies Spurs Future Supercomputer. Von Jarrett Cohen in: NASA HPCC Insights, Nr. 6, Juli 1998. Im Web unter www.hq.nasa.gov/hpcc/insights/vol6/supercom.htm

In Pursuit of a Quadrillion Operations per Second. Von Thomas Sterling in: NASA HPCC Insights, Nr. 5, April 1998. Im Web unter www.hq.nasa.gov/hpcc/insights/vol5/petaflop.htm

Dieser Artikel ist Teil 1 einer zweiteiligen Serie über die Supercomputer der nächsten Generation. Teil 2, „Der selbst gebastelte Supercomputer“, erscheint im Märzheft.



„Wir befinden uns noch in der Pionierphase“

In zehn Jahren wird der schnellste Computer der Welt noch ein klassischer Digitalrechner sein. Ein Quantencomputer könnte dagegen mit einem völlig anderen Prinzip ungeahnte Rechenleistungen erbringen – nicht in zehn Jahren, aber vielleicht später. Peter Zoller, theoretischer Physiker an der Universität Innsbruck und einer der Pioniere des Quantencomputing, äußert sich zum Stand der Forschung.

Spektrum: *Werden wir in fünf Jahren mit Quanten-Supercomputern arbeiten?*

Zoller: Mit Sicherheit nicht. Vergleichen wir das Quantencomputing mit der klassischen Informatik. Dann sind wir heute ungefähr in der Situation der dreißiger Jahre, als Turing, Shannon und andere die mathematischen Theorien der Berechnung und der Kommunikation bereitstellten. Zu dieser Zeit gab es an Hardware allenfalls eine Spielwiese, gemessen am heutigen Stand: ein paar Röhren, mehr nicht. Das hat die Leute nicht daran gehindert, weit gehende Theorien zu entwickeln.

Genau so geht es uns heute. Wir beginnen allmählich zu verstehen, was Quanteninformation ist. Wir haben gerade die Spitze eines Eisbergs entdeckt, unter der noch eine große Menge an Theorie auf ihre Entdeckung wartet. Heute ist die Theorie der Praxis weit voraus. Wir beherrschen gerade mit Mühe einige wenige Qubits auf unserer Spielwiese. Das hindert uns nicht, über sehr interessante Berechnungen nachzudenken, die um die 1000 Qubits erfordern würden.

Spektrum: *Wie weit sind wir von konkreten Anwendungen entfernt?*

Zoller: Wenn nicht der große überraschende Durchbruch kommt – vergleichbar der Erfindung des Transistors –, dann werden wir in den nächsten zwanzig Jahren keinen Quantencomputer sehen, der große Zahlen nach dem Algorithmus von Peter Shor faktorisiert oder ähnlich spektakuläre Dinge tut.

Aber man soll nicht immer nur gebannt auf den Mount Everest schauen. Es gibt unterwegs eine Menge attraktiver Nebengipfel, zum Beispiel für Quantenkryptographie, zur vertraulichen Datenübertragung und zur Simulation von quantenmechanischen Systemen durch Quantencomputer. Oft ist auch der Weg interessanter als das Ziel selbst.

Wir werden in wenigen Jahren Quantencomputer mit zehn bis zwanzig Qubits zur Verfügung haben.

Spektrum: *Welche Implementierungen werden in nächster Zeit realisiert werden?*

Zoller: Eine Vorreiterrolle kommt sicherlich der Quantenoptik zu. Man kann schon heute mit Laserstrahlen den quantenmechanischen Zustand von Atomen manipulieren, und genau das braucht man für einen Quantencomputer. Außerdem weiß man aus Experimenten, dass solche Systeme verhältnismäßig wenig unter Dekohärenz leiden. Das heißt, der Kollaps der quantenmechanischen Wellenfunktion, der den Überlagerungszustand und damit das Ergebnis der Berechnung zerstört, lässt sich hinreichend lange unterdrücken, indem man das System sorgfältig gegen seine Umgebung abschirmt. Andere Verfahren sind prinzipiell nicht so weit von der Quantenoptik entfernt – Kernspinresonanz (NMR) beispielsweise. Dabei dienen interne Freiheitsgrade – insbesondere der Kernspin – als Qubits.

Spektrum: *Wie weit ist das Problem der Speicherung von Qubits gelöst?*

Zoller: In nahezu idealer Weise. Ob wir nun Ionenfallen nehmen oder die internen Zustände bei der NMR, wir können ▶

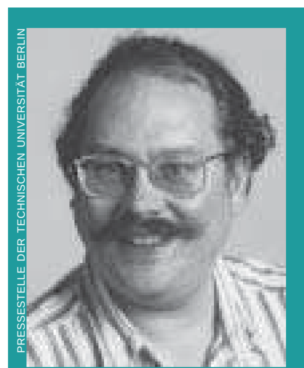
Ein **Qubit** („quantum bit“) ist der elementare Bestandteil eines Quantencomputers. Während in einem klassischen Computer jedes Element die Zustände 0 und 1 annehmen kann (ein Bit), ist in einem Qubit eine quantenmechanische Überlagerung dieser zwei Zustände realisiert. Ein Quantencomputer mit mehreren Qubits rechnet nicht nur mit einer bestimmten Kombination aus Nullen und Einsen (sprich einer Zahl), sondern mit allen möglichen Kombinationen (Zahlen) zugleich (Spektrum der Wissenschaft 12/1995, S. 62).

einen Quantenzustand im Prinzip beliebig lange speichern, bevor Dekohärenz eintritt – oder jedenfalls weitaus länger, als bis sie bei einer Rechenoperation eintritt.

Spektrum: *Wie lange?*

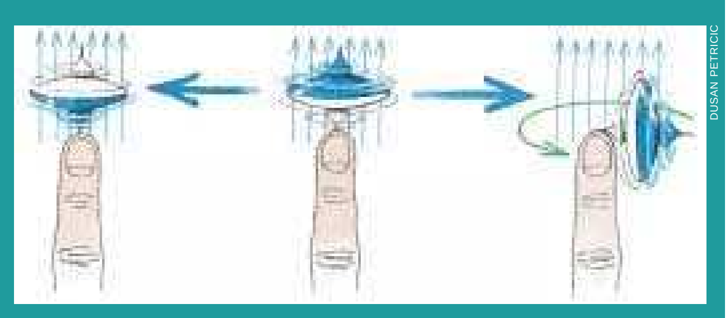
Zoller: Wenn Sie heute einem Experimentalphysiker den Arm auf den Rücken drehen, dann sagt er Ihnen zu, dass er einen Quantenzustand über eine Stunde hinweg halten kann. Das würde reichen. Und in den letzten Jahren haben sich immer mehr experimentelle Nachweise dafür angesammelt, dass diese optimistische Einschätzung tatsächlich zutrifft.

Spektrum: *Das war also der einfache Teil. Und wo ist der schwierige?*



PRESSESTELLE DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BERLIN

Peter W. Shor hat einen Algorithmus gefunden, mit dem ein Quantencomputer die Primfaktoren einer sehr großen Zahl finden kann. Das Verfahren kommt dem simultanen Durchprobieren aller Zahlen gleich, die als Faktoren in Frage kommen. Ein funktionierender Quantencomputer würde die Sicherheit gängiger Verschlüsselungssysteme untergraben, die darauf beruht, dass das Faktorisierungsproblem mit klassischen Rechnern nur mit extrem hohem Zeitaufwand zu lösen ist (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 80).



DUSAN PETRICIC

Kernspinresonanz (***nuclear magnetic resonance*, NMR**) ist derselbe Effekt, der auch in der Medizin zur Tomographie eingesetzt wird. Die Kernspins der Atome eines Moleküls sind über die chemische Bindung gekoppelt; Moleküle dienen damit als primitive Quantencomputer (Spektrum der Wissenschaft 8/1998, S. 54).



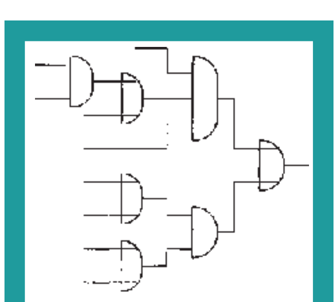
FOTO: DAN WAGNER, BEARBEITUNG: JACK HARRIS, VISUAL LOGIC

Eine **Schrödinger-Katze** ist, in Anspielung auf Schrödingers viel zitiertes Gedankenexperiment, ein makroskopischer Überlagerungszustand, das heißt einer, bei dem die quantenmechanische Unbestimmtheit bis auf ein makroskopisches Objekt durchschlägt, zum Beispiel eine Katze, von der unbestimmt ist, ob sie lebt oder tot ist (Spektrum der Wissenschaft 8/1996, S. 24).

Zoller: Beim Rechnen. Genauer: bei der Konstruktion von Zwei-Qubit-Gattern.

Man muss ja, um Informationen zu verknüpfen, die Zustände zweier Qubits quantenmechanisch miteinander verschränken. Dabei muss man so genannte konditionelle Dynamik betreiben, das heißt, in Abhängigkeit vom Zustand des einen Qubits den des anderen verändern. Man schafft sozusagen Schrödinger-Katzen.

Das ist schwierig. Man muss den Zustand des Systems kontrollieren, aber nicht so, dass Information über diesen Zustand anfällt. Denn das liefe auf eine Messung hinaus, und Dekohärenz wäre die Folge.



Ein **Gatter** (*gate*) ist das elementare Schaltelement im Inneren eines klassischen Computers. Es macht durch logische Verknüpfung aus zwei oder mehr Eingangswerten einen Ausgangswert. UND-Gatter (leere Kästchen), ODER-Gatter (Kästchen mit durchgezogenen Eingangslinien) und NICHT-Gatter können, geeignet zusammengeschaltet, jede Verknüpfung von Wahrheitswerten und damit jede Rechenoperation realisieren.

➤ In der Quantenoptik sind die Qubits interne Spinzustände von Ionen, die in Ionenfallen stecken, und die werden über eine kollektive Schwingung verknüpft, die wie ein Datenbus wirkt: Mit einem Laserpuls kann man den internen Zustand eines Ions auf die Schwingung übertragen.

➤ In der Hohlraum-Quantenelektrodynamik (*cavity QED*) hängt man Atome in einem Hohlraum-Resonator auf und verwendet Photonen als Datenbus.

➤ In der Festkörperphysik ist folgende Idee entwickelt worden: Die Qubits sind durch Elektronen in Quantenpunkten realisiert. In den Quantenpunkten wird jeweils ein zusätzliches Elektron gespeichert; dessen Spin ist der Träger des Qubits. Die Kopplung zwischen zwei Qubits wird zum Beispiel über ein Dipolfeld hergestellt. Daniel Loss von der Universität Basel und David DiVincenzo vom T.-J.-Watson-Forschungszentrum der IBM haben da Pionierarbeit geleistet.

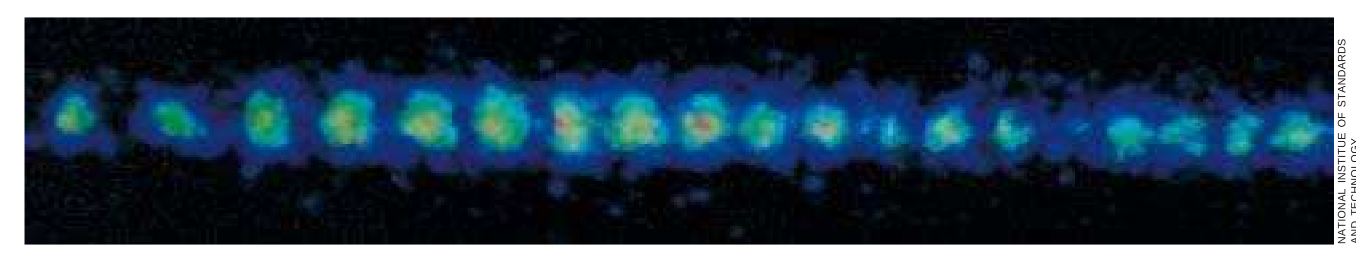
Spektrum: *Wie sind die Zukunftsaussichten der NMR?*

Zoller: NMR ist eigentlich eine sehr clevere Idee, weil man mit ihr Quanten-Computing in bereits existierenden Systemen – zum Beispiel Flüssigkeiten – betreiben kann. Ihr Nachteil ist, dass die Bewegung der Kernspins stets durch einen nicht kontrollierbaren Anteil gestört wird. Diese Bewegung hat die typischen Eigenschaften einer Wärmebewegung – man spricht von der inneren Spintemperatur – und ist weit größer als der Effekt, der einen eigentlich interessiert. Man arbeitet also nicht mit reinen Quantenzuständen, sondern stets mit einem Zustandsgemisch. Das hat zur Folge, dass mit wachsender Anzahl von Qubits das Signal-Rausch-Verhältnis exponentiell schlecht wird. Das verdirbt die Skalierbarkeit.

Spektrum: *Welche Realisierungsideen gibt es noch?*

Zoller: In der Festkörperphysik arbeitet man intensiv an Josephson-Kontakten. Gerd Schön aus Karlsruhe hat ein Konzept vorgeschlagen, und die Gruppe von Hans Mooij in Delft (Niederlande) arbeitet an der Realisierung. Die relevanten Quantenfreiheitsgrade sind die Ladungen von Cooper-Paaren.

Der supraleitende Zustand verspricht lange Dekohärenzzeiten. Ein erstes Experiment von Y. Nakamura in Japan bei NEC bestätigt diese theoretische Vorhersage. ▶



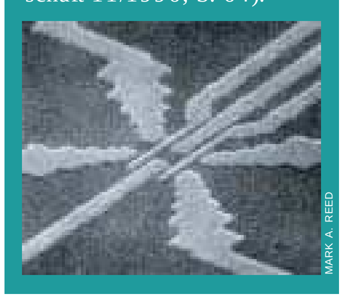
NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY

So könnte die unmittelbare Ausgabe eines Quantencomputers aussehen. Jeder farbige Fleck entspricht dem Floureszenzlicht eines einzelnen Quecksilber-Ions in einer Ionenfalle. Die Lichtpunkte zeigen, dass alle Ionen im gleichen Zustand sind; die Ausgabe ist also in diesem Falle eine Folge von lauter Einsen.

Bruce Kane, der inzwischen an der University of Maryland arbeitet, verfolgt die Idee, einzelne Phosphoratome in einen Festkörper zu implantieren und deren Kernspins durch von außen angelegte Elektroden zu kontrollieren. Das wäre ein NMR-Computer, der nicht unter den oben genannten Skalierungsproblemen leidet und obendrein mit einer weiter entwickelten Halbleitertechnik zu fertigen wäre. In Australien arbeitet eine achtzigköpfige Gruppe an der Realisierung der Idee.

Das klingt alles sehr viel versprechend. Allerdings muss man vorsichtig sein. Es gibt auf dem Gebiet mehr Hoffnungen als experimentelle Tatsachen. Mit Sicherheit gibt es nicht nur technische Hürden zu überwinden, sondern noch allerlei neue Physik zu entdecken.

Quantenpunkte (*quantum dots*) sind winzige Halbleiterstrukturen aus einigen hundert Atomen. Darin eingesperrte Elektronen besitzen ähnlich wie in Atomen diskrete Energiezustände (Spektrum der Wissenschaft 11/1996, S. 64).



MARK A. REED

Spektrum: *Was wird man mit den Quantencomputern der näheren Zukunft tun können?*

Zoller: Mit dreißig Qubits wird man den Shor-Algorithmus nicht sinnvoll rechnen können. Zunächst werden die Geräte dazu dienen, die theoretischen Behauptungen zu verifizieren. Schon am kleinen Beispiel kann man studieren, ob die theoretisch mögliche Fehlerkorrektur tatsächlich funktioniert.

Die Physiker begeistert noch etwas ganz anderes: Quantencomputer sind insbesondere quantenmechanische Systeme. Hier gibt es zum Beispiel eine Möglichkeit, Schrödinger-Katzen zu erzeugen und beliebig lange am Leben zu halten. Man kann also mit diesen Geräten Quantenphysik treiben in einer Weise, die bisher nicht möglich war. Die Leute reden vom Feynman-Lab in Anspielung auf das Fermilab und auf Richard Feynman, der ein Vordenker des Quantencomputers war. Es geht darum, die Grenzen der Quantenmechanik zum Makroskopischen aufzuzeigen.

Vielleicht stellt sich sogar am Ende heraus, dass die Quantenmechanik falsch ist, und das würde die Physiker natürlich besonders begeistern. In diesem Sinne ist ein Quantencomputer ein Labor ganz neuer Art.

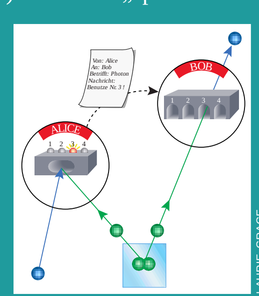
Spektrum: *Kann man denn Quantum-Computing auch fürs Computing verwenden, sprich für unmittelbar nützliche Zwecke?*

Zoller: Es gibt im Wesentlichen zwei Anwendungen. Wenn Sie Quantenkommunikation über große Entfernungen betreiben wollen, brauchen Sie so etwas wie Zwischenverstärker (Repeater), weil die Photonen in der Glasfaser auf die Dauer absorbiert werden. Ein klassischer Repeater empfängt das Signal, reinigt und verstärkt es und schickt es weiter. Das kann in der Quantenkommunikation so nicht funktionieren, weil das Empfangen ja eine Messung impliziert. Man arbeitet stattdessen mit quantenmechanisch verschränkten, weit voneinander entfernten (EPR-)Photonenpaaren.

Um das realisieren zu können, braucht man Atome als Quantenspeicher. Ein kleiner Quantencomputer würde schon einen ganz guten Quanten-Repeater abgeben. In eine Langstrecken-Kommunikationsverbindung müsste man vielleicht alle fünfzig Kilometer ein solches Gerät einsetzen. Diese Anwendung liegt in der absehbaren Zukunft, sagen wir zehn Jahre.

Eine andere Anwendung liegt wieder in der Physik, und zwar die Simulation quantenmechanischer Systeme mit einem Quantencomputer. Ein Zahlenbeispiel: Um ein System mit 300 Spin-1/2-Teilchen auf einem herkömmlichen Computer zu simulieren, bräuchte man mehr Speicherplätze, als das Universum Atome enthält. Dagegen würde ein Quantencomputer mit 300 Qubits genügen.

Nach dem **EPR-(Einstein-Podolsky-Rosen)-Paradox** verändert die Messung eines Photons augenblicklich den quantenmechanischen Zustand seines Partner-Photons, mit dem es durch eine gemeinsame Entstehung verbunden („verschränkt") ist. Diese „spukhafte Fernwirkung" ist zumindest im Prinzip für eine Quanten-Teleportation nutzbar (Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30).



LAURIE GRACE

Spektrum: *Ein Quanten-Analogrechner?*

Zoller: Das könnte man sagen – mit aller Vorsicht, denn die Fehlerkorrektur ist eher „digital" als „analog". Die großen mathematischen Probleme wird man in absehbarer Zeit nicht lösen können – es sei denn, es käme der oben genannte „Durchbruch zum Transistor". Aber solche Durchbrüche sind natürlich prinzipiell nicht vorherzusagen.

Das Interview führte ***Christoph Pöppe****, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Literaturhinweise

Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. Von Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin und J. S. Tsai in: Nature, Bd. 398, S. 786, 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*

CHEMISCHE WAFFEN

Die unerträgliche Leichtigkeit des Sarins

Terroristen können mit einfachen Mitteln tödliche Nervengase herstellen. Die Zutaten dafür kommen bequem und schnell mit der Post.

Von George Musser

Wie realistisch sind Terrorattacken mit chemischen Waffen? Fachleute sind da durchaus geteilter Meinung. Manche halten es für zu schwierig, tödliche Gase herzustellen und einzusetzen. Andere hingegen warnen davor, Fähigkeiten und Skrupellosigkeit von Terroristen zu unterschätzen. Einig sind sich jedoch alle in einem Punkt: Man sollte es potenziellen Tätern nicht zu leicht machen. Genau deshalb ist der nachfolgend geschilderte Fall so erschreckend.

James M. Tour ist Professor für Chemie und für Werkstoffkunde an der Rice-Universität in Houston (Texas). Seit mehr als zehn Jahren arbeitet er am Entwurf und an der Synthese von organischen Molekülen für molekulare Schaltelemente. Seine Mitwirkung an der Erfindung der kleinsten elektronischen Schalter der Welt hat ihn auch international bekannt gemacht (siehe „Rechnen mit Molekülen“, Spektrum der Wissenschaft 8/2000, S. 38). Für das US-Verteidigungsministerium untersuchte er den möglichen Einsatz von chemischen Waffen durch Terroristen. In dieser Studie kam Tour zu dem Schluss, dass die Grundmaterialien für die Herstellung chemischer Kampfstoffe sehr leicht zu beschaffen seien und es keinerlei Sicherheitskontrollen gebe. Deshalb plädierte er in einem Artikel, der am 10. Juli 2000 in der Zeitschrift „Chemical & Engineering News“ erschien, dafür, den freien Verkauf bestimmter Chemikalien einzuschränken.

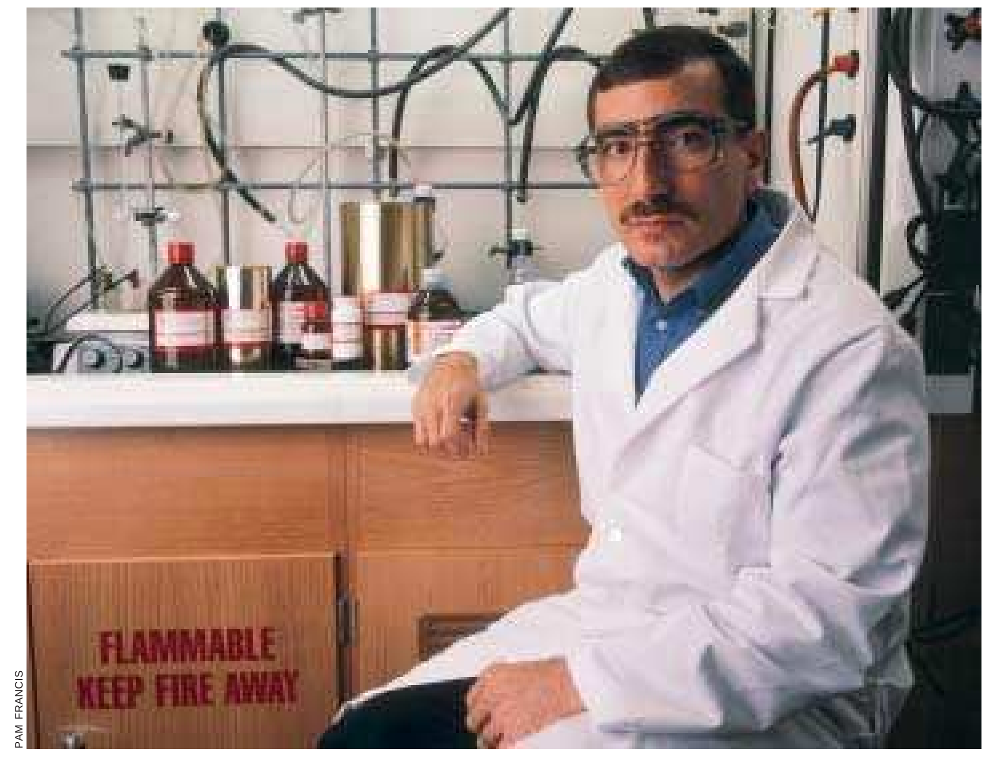
Leider scheint dieser Artikel in genau demselben Papierkorb gelandet zu sein wie schon ähnliche Warnungen zuvor. Ein Wehrexperte versicherte dem Chemiker Tour, dass die Behörden bereits „jeden Teelöffel voll“ potenziellen Waffenmaterials überwachten.

Daraufhin führte Tour ein kleines Experiment durch. Er füllte ein Bestellformular für all jene Chemikalien aus, die er brauchte, um drei der gefährlichsten Nervengifte herzustellen: Sarin (auch unter der Bezeichnung „GB“ bekannt), Soman (GD) und Cyclosarin (GF). Die drei Substanzen sind chemisch verwandt; es handelt sich um Ester eines Derivats der Phosphonsäure. Den Kampfstoff Sarin hatte die japanische Aum-Shinrikyo-Sekte bei ihren beiden Anschlägen 1994 und 1995 eingesetzt. Seine Bestellung ließ Tour an die Firma Sigma-Aldrich schicken, eine der angesehensten Produktions- und Vertriebsgesellschaften für Chemikalien in den USA. Wenn irgendeine Bestellung Alarm auslösen sollte, dann diese.

Doch anstatt Besuch von der Bundespolizei FBI zu erhalten, bekam Tour bereits am nächsten Tag ein großes Paket mit den gewünschten Substanzen. Anhand einer der bekannten Sarin-Rezepturen – Dimethylmethylphosphonat, Phosphortrichlorid, Natriumfluorid und Alkohol müssen in geeigneten Anteilen und in richtiger Reihenfolge gemischt werden – hätte er 280 Gramm des Giftes oder eine vergleichbare Menge Soman oder Cyclosarin herstellen können (was mehr als 100 Teelöffel voll gewesen wären). Und das für nur 130,20 US-Dollar zuzüglich Bearbeitungs- und Versandgebühren.

Der Einsatz des Wirkstoffes wäre ebenfalls kein Kunststück. Um sich nicht selbst zu gefährden, könnten Terroristen eine so genannte Binärwaffe bauen, in der die chemische Reaktion zur Herstellung des Giftes erst vor Ort in Gang gesetzt wird. Mit einem herkömmlichen Spritzgerät für Pflanzenschutzmittel ließe sich die Mischung dann in die Klimaschächte eines Gebäudes blasen. Abhängig von der Verteilung des Nervengiftes und der Zahl der anwesenden Personen reichten 280 Gramm Sarin aus, hunderte oder tausende Menschen zu töten. Die Aum-Sekte hatte für ihren Anschlag auf mehrere U-Bahn-Stationen in Tokio etwa 5000 Gramm Sarin eingesetzt – allerdings ohne Sprühgerät – und damit zwölf Personen getötet.

Gewiss: Der Chemiker James Tour ist in seiner Branche jedem bekannt, und er könnte bei Sigma-Aldrich wohl jederzeit jede beliebige Chemikalie bestellen. Doch die meisten Vertriebsfirmen überprüfen ihre Kunden nicht. Man brauche



PAM FRANCIS

Machte die Probe aufs Exempel: Mühelos gelang es dem Chemiker James M. Tour, die Ausgangsstoffe für das Nervengas Sarin zu bekommen.



PAM FRANCIS

Richtig gemixt ergibt der Inhalt dieser Flaschen und Dosen den tödlichen Kampfstoff Sarin.

sich nur an eine Internet-Firma zu wenden, eine Kreditkartennummer anzugeben und schon erhalte man das Gewünschte per Post, so Tour. (Zum Test gab die Redaktion von „Scientific American", der Mutterzeitschrift von „Spektrum der Wissenschaft", eine Bestellung bei einem kleinen Lieferanten auf. Die gewünschte Ware wurde geliefert.)

Fachleute sind sich darüber einig, dass der Zugang zu den chemischen Grundstoffen für Nervengase streng kontrolliert werden müsse – zumal jetzt, nach dem 11. September 2001, die anderen mit der Vorbereitung eines Giftgasanschlages verbundenen Schwierigkeiten gar nicht mehr so problematisch erscheinen. Die Hemmnisse auf Seiten der Terroristen dürften geringer sein als zuvor vermutet: Für Selbstmordkommandos stellt sich die Frage nicht, ob sie sich nach dem Einsatz von Giftgas noch in Sicherheit bringen können.

Es gibt zwar Bedenken, dass Zugangsbeschränkungen für die besagten Chemikalien den legalen Nutzern nicht zuzumuten seien und einen zu allem entschlossenen Terroristen sowieso nicht aufhalten könnten. Die Chemie-Industrie kommt indes auch mit den Kontrollen für drogenrelevante Chemikalien klar. Und ein geringes Maß an Schutz wäre allemal besser als gar keiner. „Jeder weist darauf hin, wie ein Überwachungssystem umgangen werden könne", so Tour. „Natürlich muss das bedacht werden. Doch das Problem ist, dass es im Moment gar nichts zu umgehen gibt." ■

George Musser ist Redakteur bei Scientific American.

BIOLOGISCHE WAFFEN

Zwischen Massenpanik und Massenmord

Manche Mikroorganismen sind effiziente Killer. Doch wie groß ist die Bedrohung durch Bio-Terrorismus wirklich?

Von Ed Regis

Nach den Terroranschlägen vom 11. September auf das World Trade Center in New York und das Pentagon in Washington fürchtet sich die Welt vor Attacken mit biologischen Waffen. Der Tod von fünf Menschen infolge einer Milzbrandinfektion und die Erkrankung weiterer Personen in den USA haben diese Ängste weiter geschürt – zumal der Eindruck entstanden ist, das medizinische Versorgungssystem sei schlecht auf eine solche Katastrophe vorbereitet. Die hieraus entstandene Massenhysterie hat die US-Bürger dazu getrieben, alle Gasmasken- und Cipro-Bestände – das einzige in den Vereinigten Staaten zugelassene Milzbrand-Antibiotikum – aufzukaufen. Eines ist dadurch klar geworden: Mikroorganismen sind erstaunlich effiziente Mittel zur Terrorisierung breiter Massen. Ihr Potenzial als Massenvernichtungswaffe ist hingegen weniger eindeutig.

Für eine biologische beziehungsweise bakteriologische Kriegführung im modernen Sinn müssten die Erreger – Viren, Bakterien oder Rickettsien – als Aerosole verbreitet werden. Die dazu erforderlichen Techniken wie etwa Bomben oder Sprühdüsen wurden bereits 1923 erprobt. Damals ließen französische Wissenschaftler mit Erregern gefüllte Bomben über einer Tierherde auf einem Feld bei Sevran-Livry, 15 Kilometer nordwestlich von Paris, detonieren. Viele Versuchstiere wurden dabei getötet.

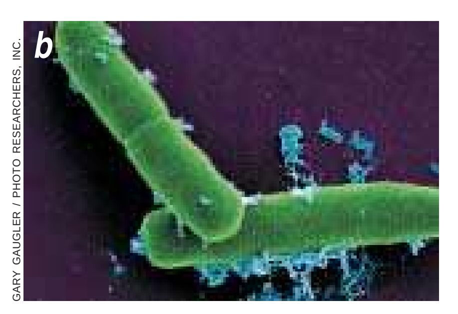
Ab 1943 arbeiteten die Vereinigten Staaten an einem eigenen Forschungsprogramm zur biologischen Kriegführung, das schließlich 1969 von US-Präsident Richard Nixon abgebrochen wurde (siehe „Die Anfänge des US-Programms für biologische Waffen", Spektrum der Wissenschaft 8/1987, S. 118). Im Rahmen dieses Programms machte die US-Armee mehrere Bakterien und Viren „waffenfähig", indem sie die Erreger in geeignete Form brachte und in spezielle Trägersysteme füllte. Dazu gehörten *Bacillus anthracis* und *Francisella tularensis*, die Milzbrand und Tularämie (Hasenpest) auslösen, sowie die Erreger von Brucellose, Q-Fieber und Venezuela-Enzephalitis. Während die beiden ersten dieser Krankheiten zumeist tödlich enden, fordern die anderen drei kaum Opfer, können aber ganze Divisionen für einige Zeit außer Gefecht setzen. Zusätzlich produzierten die USA militärisch einsetzbare Versionen des tödlichen Bo- ▶


STEVE MITCHELL / AP PHOTO

Mitarbeiter des FBI in speziellen Schutzanzügen untersuchen die Milzbrandfälle im Gebäude eines Medienhauses in Florida.



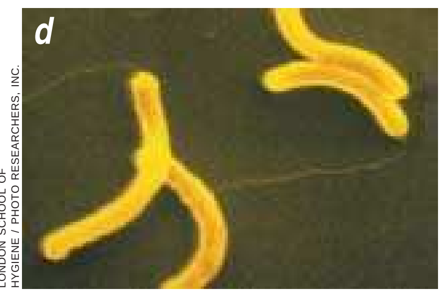
LONDON SCHOOL OF HYGIENE / PHOTO RESEARCHERS, INC.



GARY GAUGLER / PHOTO RESEARCHERS, INC.



A. DOWSETT / PHOTO RESEARCHERS, INC.



LONDON SCHOOL OF HYGIENE / PHOTO RESEARCHERS, INC.

Das „Verbrecheralbum" der für Bio-Waffen geeigneten Mikroben enthält die Erreger von Pocken (*a*), Milzbrand (*b*), Botulismus (*c*) und Cholera (*d*).

tulinus-Toxins und des gefährlichen Staphylokokken-Enterotoxins Typ B. Außerdem stellten sie mehr als 2,5 Millionen Bombenhülsen her, die im Bedarfsfall mit einem biologischen Kampfstoff befüllt werden könnten. Auch andere Staaten, darunter die Sowjetunion, führten damals und in den nachfolgenden Jahren ähnliche Programme durch und häuften riesige Arsenale von einsatzbereiten Bio-Waffen an.

Gleichwohl bleibt festzuhalten, dass keiner dieser Staaten solche Waffen in einem Krieg eingesetzt hat. Denn Mikroorganismen mögen zwar hervorragende Mordinstrumente sein, aber sie geben schlechte Waffen ab. Zum einen tritt die Wirkung wegen der teilweise recht langen Inkubationszeit verzögert ein. Zum anderen könnte die ausgelöste Epidemie irrtümlich für einen natürlichen Ausbruch der Krankheit gehalten werden und nicht für einen Militärschlag. Zudem ist die Wirkung biologischer Aerosole nicht genau zu kalkulieren, da sie von zufälligen Wind- und Wettereinflüssen abhängt. Deshalb fehlen biologischen Waffen einige der Eigenschaften, die Militärs an konventionellen Sprengbomben so schätzen: dramatische, eindrucksvolle Knalleffekte, sofort erkennbare Wirkung und hohe Zuverlässigkeit. Auch das Wissen, der Gegner könnte auf einen biologischen Angriff auf gleiche Weise zurückschlagen, hat bisher geholfen, einen Einsatz zu verhindern. Neben diesem Abschreckungseffekt kamen auch moralische Bedenken zum Tragen.

Diese Aussagen gelten jedoch nicht unbedingt für Terroristen, insbesondere nicht für solche Gruppierungen, die ohnehin außerhalb der traditionellen moralischen Normen agieren und die eine Gesellschaft zersetzen und destabilisieren wollen, indem sie Angst und Schrecken in der Bevölkerung verbreiten. Gerade weil sie unsichtbar sind und still und langsam wirken, können gezielt ausgebrachte Krankheitserreger kollektive Angstzustände bis hin zur Massenhysterie hervorrufen. Glücklicherweise sind in der Geschichte nicht viele erfolgreiche Anschläge mit biologischen (oder chemischen) Kampfstoffen zu verzeichnen. Vor dem Oktober 2001 gab es in den USA noch nie ein Todesopfer durch eine biologische Waffe. Der in Atlantis (Florida) an Lungenmilzbrand gestorbene Fotoredakteur war der erste derartige Fall. Und selbst die mehrfach aufgetauchten, mit Milzbranderregern verseuchten Briefe haben sich nicht zu einem groß angelegten Anschlag ausgeweitet.

Die bislang einzige biologische Attacke mittleren Umfangs gab es 1984, als die im US-Bundesstaat Oregon ansässige Rajneesh-Sekte in mehreren Restaurants die Salatbars mit Salmonellen verseuchte und es in der Folge 751 Fälle von Durchfallerkrankungen gab. (Im Vergleich hierzu sind in den USA jedes Jahr 76 Millionen durch Lebensmittel hervorgerufene Erkrankungen zu verzeichnen; 315 000 dieser Patienten müssen stationär behandelt werden und 5000 von ihnen sterben.)

Selbst wenn Terroristen entschlossen wären, biologische Kampfstoffe einzusetzen, so hätten sie doch nicht unbedingt die notwendigen technischen Mittel zur Verfügung. In der Presse finden sich zwar immer wieder Szenarien, wo Bioterroristen in der Küche, im Keller oder mit Hobbybaukästen tödliche Agenzien zusammenbrauen. Doch das Fachwissen, das man braucht, um einen virulenten Erreger in für eine Massenerkrankung ausreichenden Mengen zu kultivieren, zu transportieren und zu verteilen, ist immens.

Um erfolgreich zu sein, muss ein Bioterrorist zunächst einen virulenten Stamm des gewünschten Mikroorganismus auftreiben. (Viele natürliche Stämme infektiöser Agenzien sind nicht virulent genug für biologische Waffen.) Der Erreger muss in großen Mengen kultiviert, in geeigneter Weise bearbeitet und während des Transports zum Einsatzort am Leben und virulent gehalten werden.

Glossar

Bakterien sind einzellige Mikroorganismen und damit die kleinsten Lebewesen. Sie haben eine relativ einfache Zellstruktur und vermehren sich durch Zweiteilung.

Endosporen nennt man die Verbreitungs- oder Überdauerungszellen, die innerhalb eines Sporenbehälters gebildet und aus diesem freigesetzt werden. Sie zeichnen sich durch hohe Resistenz gegenüber UV-Strahlung, Chemikalien und Hitzebehandlung aus.

Rickettsien sind ebenfalls Bakterien, von denen sich die meisten jedoch nur in tierischen Zellen vermehren können, da ihnen einige essenzielle Zellstoffe fehlen, die sie von ihrer Wirtszelle aufnehmen müssen.

Toxine sind organische Substanzen oder Produkte von Organismen, die Zellen oder Lebewesen schädigen oder töten können.

Viren sind Erreger, denen praktisch die gesamten biosynthetischen Kapazitäten lebender Zellen fehlen. Sie sind deshalb nicht als Lebewesen einzustufen. Auch sie können sich nur in Wirtszellen vermehren.

Virulenz ist die Fähigkeit von Erregern, eine Erkrankung im befallenen Organismus hervorzurufen.

Er muss sodann die Hitze und den Druck bei der Explosion einer biologischen Bombe beziehungsweise die mechanischen Scherkräfte bei der Zerstäubung durch einen Sprüher aushalten können. Schließlich muss er am Ziel in geeigneter Partikelgröße und ausreichender Konzentration über ein großes Areal verteilt werden, um eine Masseninfektion hervorzurufen. Jeder einzelne Schritt birgt seine Probleme. In den USA hat eine Gruppe hoch qualifizierter Forscher mehr als zehn Jahre benötigt, um das erste zuverlässige Trägersystem für Bio-Waffen zu entwickeln.

Die Bedrohung der Vereinigten Staaten durch Bioterrorismus hat Milton Leitenberg vom Center for International and Security Studies an der Universität von Maryland untersucht. In seiner Mitte 2000 fertig gestellten Studie kam er zu dem Schluss, dass

➤ Fehlalarme und Erpressungsversuche wahrscheinlicher sind als der tatsächliche Einsatz von biologischen Kampfstoffen,

➤ begrenzte Sabotageakte oder Versuche, einzelne Personen zu ermorden, eher zu erwarten sind als groß angelegte Anschläge mit dem Ziel eines Massenmords, und

➤ eine tatsächliche Attacke wohl nur in einem begrenzten Areal und mit nicht optimaler Ausbreitung des Erregers zu erwarten wäre.

Im Nachhinein erscheinen diese Vorhersagen als geradezu prophetisch. Bei sämtlichen Milzbrandfällen im Oktober 2001 stellte sich heraus, dass die Verbreitungsmethode sehr ineffizient war. Alle verseuchten Briefe zusammen enthielten weniger als ein Gramm Milzbrand-Endosporen. Solche Mengen sind nur für Laborzwecke geeignet, und mit ihnen lässt sich kein Massenangriff starten. Auf dem Höhepunkt des amerikanischen Bio-Waffen-Programms beispielsweise befanden sich in einer Produktionsanlage der US-Armee in Vigo (Indiana) zwölf Fermentierungstanks mit einem Fassungsvermögen von je 75 000 Litern, von denen jeder einzelne tonnenweise Milzbrand-Endosporen produzieren konnte. Doch immerhin würden auch Labormengen – auf geeignete Weise etwa in einer U-Bahn-Station freigesetzt – eine erhebliche Anzahl von Opfern fordern, auch wenn sich über deren Anzahl nur spekulieren lässt.

Selbst eine Verbreitung von so genannten militärischen oder waffenfähigen Milzbranderregern (hierbei handelt es sich um ein grob definiertes Maß für das Potenzial eines Erregers, eine Massenerkrankung zu verursachen) bietet für Terroristen noch keine Erfolgsgarantie. Im Jahr 1979 wurden bei einem Unglück in einer Bio-Waffen-Produktionsanlage im russischen Swerdlowsk rund zehn Kilogramm militärisch einsetzbare Milzbrand-Endosporen freigesetzt, die dann in einer Giftwolke über die 1,2 Millionen Einwohner der Stadt zogen. Insgesamt gab es 66 Todesfälle. Eine Massenverbreitung von Milzbranderregern muss also nicht unbedingt zu Tausenden oder Zehntausenden von Opfern führen. ■

Ed Regis *war Professor für Philosophie an der Howard-Universität in der US-Bundeshauptstadt Washington und lebt nun als Wissenschaftspublizist in Maryland.*

Am Rande

Die Globalisierung der Steinzeit

Bringen Handys und Düsenflieger Fortschritt oder Rückschritt? Oder kommt beides immer zusammen?

Einst haben die Kerls auf den Bäumen gehockt“, berichtet der Dichter. Und in einem räumlich begrenzten Waldstück, möchte man hinzufügen. Solange unsere fernen Vorfahren keine effizienten Verkehrsmittel hatten, waren sie auf eine zu Fuß erreichbare Umgebung festgelegt, in der sie naturgemäß fünfzig bis hundert Stammesgenossen vorfanden. Diese konnten sie täglich von Angesicht zu Angesicht sehen und per Zuruf erreichen.

Das mit den Verkehrsmitteln hat sich inzwischen geändert, doch das Sozialverhalten kaum. Schauen Sie in Ihr Adressbuch (E-Mail oder Papier): Vermutlich stehen fünfzig bis hundert Personen drin. Nur dass diese auf weit auseinander liegenden Bäumen hocken, die womöglich auf bis zu fünf verschiedenen Kontinenten stehen.

Doch irgendwo tief in unseren Steinzeithirnen muss das Bedürfnis verankert liegen, dass wir jene Menschen, mit denen wir auf die Jagd gehen oder Tauschgeschäfte tätigen, leibhaftig vor uns sehen wollen. Nur so lässt es sich erklären, dass Unternehmen ihre sündhaft teuren Manager im Wochentakt über den Atlantik pendeln lassen, obwohl Kommunikation in Echtzeit mit Geschäftspartnern an beliebigen Orten problemlos möglich wäre.

Ganz abgesehen von der Zeit- und Energieverschwendung – laut „Nature Neuroscience“ führt Vielfliegen und der damit verbundene regelmäßige Jetlag zu messbaren Hirnschrumpfungen. Wenn Sie also demnächst jemanden im Nadelstreifenanzug auf einem Baum hocken sehen, dann wissen Sie warum.

Ganz analog lässt sich auch der aktuelle Handy-Wahn erklären. In der Steinzeitsippe waren alle Angehörigen und Stammesgenossen per Zuruf oder notfalls per Rauchzeichen erreichbar. Was die Mobilisierung uns nahm, gibt uns das Handy wieder: Sippenkontakt rund um die Uhr. So einfach wie Hinüberrufen.

Und wie beim Jetset übertönt auch hier der Ruf der Wildnis alle Bedenken und Warnungen. Na klar – ich weiß, dass die Mikrowellen keinen messbaren Effekt auf die Hirnzellen haben. Aber lassen Sie doch mal bei der nächsten Zugfahrt das Handy daheim und hören Sie den anderen Telefonierern zu. Was die sich so von Baum zu Baum zubrüllen, das wäre selbst Fred Feuerstein peinlich. Ob das nun an den Mikrowellen liegt oder an dem altvertrauten Gefühl, alle Bezugspersonen in Rufweite zu haben, ist letztlich egal. Ein Rückschritt ist es allemal.

Was lernen wir daraus für das Leben im 21. Jahrhundert? Wissenschaftlicher Fortschritt an allen Fronten, aber die Techniken, die uns erlauben würden, Probleme rational und effizient zu lösen, können sich oft nicht durchsetzen. Auch im 21. Jahrhundert wird dieselbe Straße jeden Monat aufs Neue aufgebuddelt, werden Häuser mit derselben Technologie gebaut wie vor hundert Jahren, bewegt manch einer ein bis zwei Tonnen Blech durch die Landschaft, nur um ein bis zwei Zentner Mensch von A nach B zu bringen. Was zieht – und vielleicht lässt sich diese Einsicht ja insgeheim für Mogelpackungen nutzen – sind nur die Entwicklungen, die uns auf die eine oder andere Weise dieses wunderbare Geborgenheitsgefühl der Baumhocker wiedergeben. Denn, so erkannte Erich Kästner schon vor siebzig Jahren:

„... bei Lichte betrachtet sind sie im Grund noch immer die alten Affen.“

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk

FLUGSICHERHEIT

Flugzeugentführungen: Wer übernimmt die Steuerung?

Technische Lösungen wie etwa eine Fernsteuerung vom Boden aus haben ihre Tücken.

Von Steven Ashley

Es ist eine interessante Frage, was Flugpassagiere unternehmen würden, wenn es erneut Selbstmordattentätern gelingen sollte, an Bord eines Flugzeuges zu kommen (siehe „Das Täter-Opfer-Dilemma“, Spektrum der Wissenschaft 12/2001, S. 90). Wie aber kann die Luftfahrttechnik künftige Kamikaze-Attentate vereiteln?

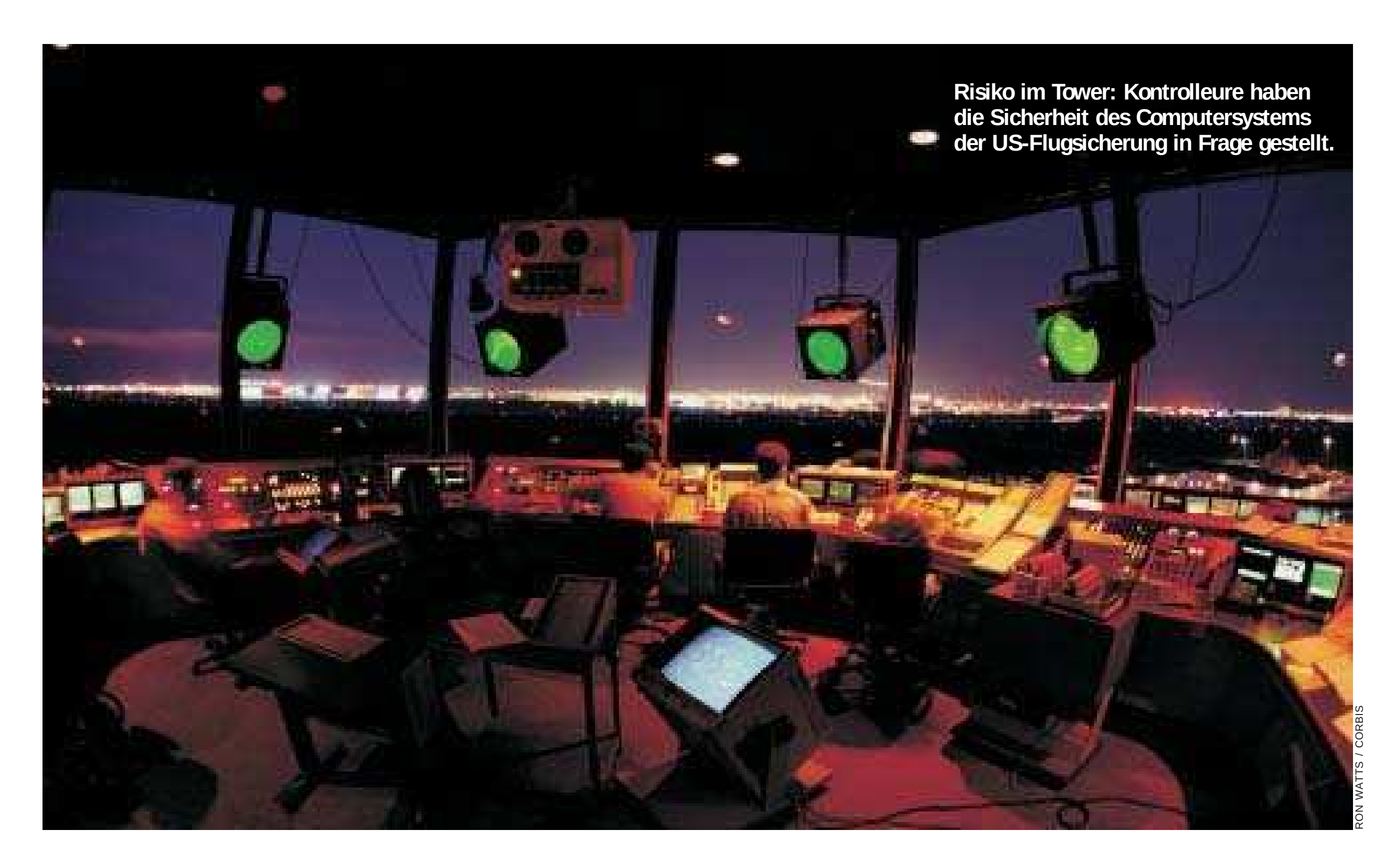
Vielleicht würde es ja reichen, die Cockpittür abzuschließen. In größeren Flugzeugen müsste man wahrscheinlich zusätzlich die Schottwand des Cockpits verstärken. Die Flugzeugentführungen am 11. September 2001 haben jedoch auch einige Hightech-Lösungen in die Diskussion gebracht. Große Aufmerksamkeit hat dabei der Vorschlag gefunden, dass ein am Boden befindlicher Pilot ein Flugzeug fernlenkt, falls Terroristen mit Flugausbildung das Cockpit entern sollten.

Es ist bereits heute möglich, ein Flugzeug automatisch ohne Zutun des Piloten zu steuern und zu landen. In der Regel wird von dieser Maßnahme jedoch nur Gebrauch gemacht, wenn die Sichtverhältnisse gleich null sind. Die meisten modernen Flugzeuge verfügen über einen Autopiloten, also ein computergesteuertes System, das Höhe, Geschwindigkeit und Richtung konstant hält. Ein solcher Autopilot könnte so umprogrammiert werden, dass er die Befehle der Entführer ignoriert und stattdessen die vom Boden aus übermittelten Befehle für eine sichere, automatische Landung auf einem nahe gelegenen Flughafen ausführt.

Piloten und die Luftfahrtindustrie im Allgemeinen haben allerdings zurückhaltend auf solche Vorschläge reagiert, der Cockpitbesatzung die Steuerung des Flugzeuges zu entziehen. Sie haben verständlicherweise Bedenken, die Kontrolle einem Computer zu überlassen. Luftfahrtexperten warnen zudem davor, dass ein System, das die Befehle nicht-autorisierter Piloten ignorieren würde, sogar ein noch größeres Risiko darstellen könnte. Denn dieses System könnte selbst zum Ziel der Terroristen werden. Jeder, der in die für die Fernsteuerung benötigten Funkverbindungen zwischen Leitzentrale und Flugzeug eingreifen kann, wäre in der Lage, eine Katastrophe herbeiführen, ohne dabei das eigene Leben aufs Spiel setzen zu müssen.

Eine besser umzusetzende Lösung könnte darin bestehen, die Programme des Bordcomputers so umzuschreiben, dass Zusammenstöße mit Gebäuden überhaupt nicht mehr möglich sind. Ein Computersystem (unterstützt durch Höhenmessungen oder digitalisierte Höhenkarten) könnte das Flugzeug so steuern, dass es selbsttätig die Richtung ändert oder höher steigt, wenn Kollisionsgefahr besteht.

Jeder Vorschlag, die bestehenden Datenverbindungen der US-amerikanischen Bundesluftfahrtbehörde (Federal Aviation Administration, FAA) zur Fernsteuerung von Flugzeugen einzusetzen, bringt zugleich den beunruhigenden Umstand ins Bewusstsein, dass die Computer der Flugsicherung leicht von Terroristen übernommen werden könnten. In sei-



Risiko im Tower: Kontrolleure haben die Sicherheit des Computersystems der US-Flugsicherung in Frage gestellt.

RON WATTS / CORBIS

ner Aussage vor dem Senatsausschuss für Handel, Wissenschaft und Transport nach den Terroranschlägen vom 11. September verwies Gerald L. Dillingham vom General Accounting Office (GAO), einer dem Bundesrechnungshof vergleichbaren Behörde, zunächst auf die ungelösten Bedenken des GAO hinsichtlich der Sicherheit des amerikanischen Flugsicherungssystems. Erst danach kam er auf die viel diskutierten Mängel in der Sicherheit der Flughäfen zu sprechen. Dillingham zufolge habe die FAA „versäumt, die Gebäude der Flugsicherung und die Computersysteme selbst zu schützen und das Fremdpersonal, das Zugang zu diesen Systemen hat, einer genauen Sicherheitsüberprüfung zu unterziehen". Und weiter: „Folglich war das Flugsicherungssystem anfällig für unbefugte Eingriffe und gezielte Anschläge. Die FAA macht gewisse Fortschritte, indem sie nun auf die 22 Empfehlungen (des GAO) zur Erhöhung der Computersicherheit eingeht. Doch die meisten dieser Punkte müssen erst noch vollständig umgesetzt werden."

Einige der in den Berichten des GAO seit 1998 aufgewiesenen Mängel hätten Dillingham zufolge gravierende Folgen haben können: „Beispielsweise ließ die FAA im Rahmen der Vorbereitungen für die Jahr-2000-Umstellung den Quellcode von acht Computersystemen für den Flugbetrieb von 36 Fachleuten aus der Volksrepublik China überarbeiten, die nicht der geforderten Sicherheitsüberprüfung unterzogen worden waren."

Nur wenige Wochen vor dieser Stellungnahme warnte das Büro des Generalinspekteurs des US-Verkehrsministeriums die FAA davor, das Flugverkehrssystem ins Internet zu integrieren, anstatt wie bisher separate Netzwerke zu benutzen. Das Büro gab zu bedenken, dass ein solcher Schritt die Flugsicherung „noch anfälliger für unbefugte Eingriffe" machen könnte, und nannte die geplante Integration „einen bedeutenden Risikofaktor".

Es muss deshalb noch viel mehr unternommen werden, um ein solch schauriges Szenario zu vermeiden, wie es die Luftfahrtbehörden in dem Actionfilm „Stirb langsam 2" von 1990 mit Bruce Willis erleben: Terroristen übernehmen darin die gesamte Elektronik der Flugsicherung und bringen absichtlich ein Flugzeug zum Absturz – als Warnung. Leider gibt es im echten Leben keinen Helden wie John McClane, der im Film in letzter Sekunde zum Retter wird und noch Schlimmeres verhindert. ■

Steven Ashley *ist Redakteur bei Scientific American.*

WOLFGANG-PAUL-PREIS

Braingain statt Braindrain

Attraktive Preisgelder sollen Spitzenforschern aus dem Ausland gute Arbeitsbedingungen an deutschen Universitäten bieten.

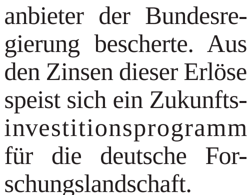
Von Alexander Pawlak

Exklusiver als der Nobel-Preis ist der „Wolfgang-Paul-Preis“, den die Alexander von Humboldt-Stiftung am 6. November 2001 vergeben hat. Er wird nur einmal verliehen, und mit Preisgeldern von bis zu 4,5 Millionen Mark ist er der höchst dotierte Preis in der deutschen Wissenschaftsgeschichte. Die Gelder sollen es den 14 ausgezeichneten internationalen Spitzenforschern ermöglichen, ihre Arbeiten drei Jahre zu finanzieren. Der Preis ist nach dem deutschen Teilchenphysiker und Nobelpreisträger Wolfgang Paul (1913–1993) benannt, der von 1979 bis 1989 Präsident der Alexander von Humboldt-Stiftung war.



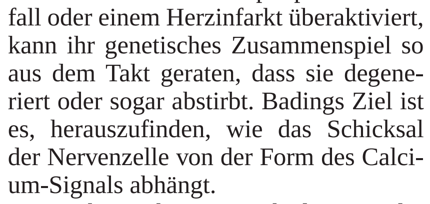
Hilmar Bading

Drei der vier deutschen Wissenschaftler, die prämiert wurden, arbeiteten bislang in den USA, einer in Großbritannien. Sie sollen nach Möglichkeit wieder dauerhaft in Deutschland forschen und lehren. Denn nicht zuletzt möchte Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn mit diesem Preis die Abwanderung deutscher Wissenschaftler umkehren – sie hat dazu das Motto „Braingain statt Braindrain“ ausgegeben. Die insgesamt 50 Millionen Mark Preisgeld des Wolfgang-Paul-Preises stammen aus dem unerwarteten Geldregen, den die Versteigerung der UMTS-Lizenzen an Mobilfunkanbieter der Bundesregierung bescherte. Aus den Zinsen dieser Erlöse speist sich ein Zukunftsinvestitionsprogramm für die deutsche Forschungslandschaft.



Joachim Herz

Die beiden Molekularbiologen Hilmar Bading (42) und Joachim Herz (43) führt der Preis wieder zurück nach Heidelberg, wo sie studiert und promoviert haben. Der Forschungsschwerpunkt von Bading sind die molekularen Grundlagen von Lern- und Gedächtnisvorgängen. Im Netz der unvorstellbar vielen Nervenzellen werden die in Form von elektrischen Signalen eintreffenden Informationen schließlich auf molekularer Ebene weiterverarbeitet. Bading, bisher in Cambridge (Großbritannien) tätig, interessiert sich vor allem für die Kommunikationswege, die von der Zelloberfläche bis in den Zellkern führen und dort die Genaktivität verändern. Als zentralen Regulator hat er das Metallion Calcium ausgemacht, welches nicht nur bestimmte Signalwege aktiviert, sondern selbst in den Zellkern eindringen kann. Wird die Nervenzelle etwa bei einem epileptischen Anfall oder einem Herzinfarkt überaktiviert, kann ihr genetisches Zusammenspiel so aus dem Takt geraten, dass sie degeneriert oder sogar abstirbt. Badings Ziel ist es, herauszufinden, wie das Schicksal der Nervenzelle von der Form des Calcium-Signals abhängt.



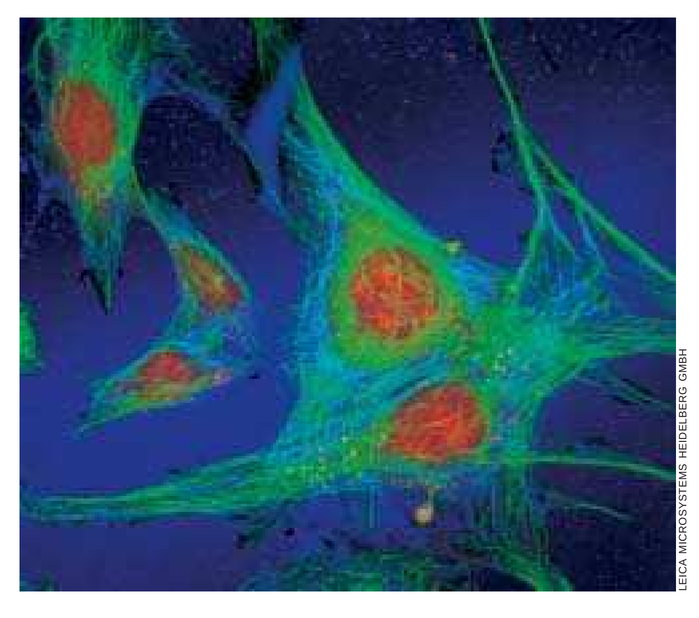
Auch Joachim Herz, bislang an der Universität von Texas in Dallas, untersucht Vorgänge in Nervenzellen. Er erforscht eine Familie von Oberflächenmolekülen, die sowohl für die Gehirnentwicklung als auch beim Entstehen der Alzheimer-Erkrankung eine wichtige Rolle spielen. Darunter sind Rezeptoren, die das Apolipoprotein E (kurz Apo E) binden. Apo E ist maßgeblich an dem Cholesterin-Transport beteiligt und mit der Entstehung von Alzheimer assoziiert. Die bisherigen Arbeiten von Herz haben gezeigt, dass die Apo-E-Rezeptoren insbesondere die Wanderung von neuen Nervenzellen in der Hirnrinde steuern – eine mögliche Basis für Medikamente, die gezielt vor Alterungserscheinungen schützen oder Folgeschäden von Schlaganfällen vermindern könnten.



ALEXANDER VON HUMBOLDT-STIFTUNG

Christiane Fellbaum

Zwischen all den Naturwissenschaftlern ist die einzige Frau unter den Preisträgern, die Linguistin Christiane Fellbaum (50), geradezu eine Exotin. Sie beschäftigt sich mit Wortverbindungen, so genannten Kollokationen, die von den üblichen Wörterbüchern – wie es ein passendes Beispiel benennen würde – meist *unter den Teppich gekehrt werden*. Das liegt vor allem daran, dass sich die Bedeutung solcher Wortverbindungen gewöhnlich nicht aus festen Regeln erschließen lässt. Fellbaum hat mit ihren Mitarbeitern an der Universität Princeton völlig neuartige Computerverfahren entwickelt, um aus dem englischen Sprachschatz ein weit verzweigtes Netz von Zu-



LEICA MICROSYSTEMS HEIDELBERG GMBH

Die Untersuchung der elastischen Eigenschaften des Cytoskeletts (grün und blau) von Zellen, hier Bindegewebszellen einer Maus, gehört zum Forschungsschwerpunkt des Wolfgang-Paul-Preisträgers Josef Käs.

(Seiten 100, 101 und 102: Anzeige und Beihefter)

sammenhängen zu extrahieren. Das „Wordnet“ genannte Projekt bildet das Vorbild für das „Digitale Wörterbuch der Deutschen Sprache des 20. Jahrhunderts“, an dem Christiane Fellbaum, finanziert mit den 3,1 Millionen Mark des Wolfgang-Paul-Preises, forschen soll. Aus einem gigantischen Textkorpus mit jeweils bestimmten Anteilen Belletristik, journalistischen Texten, Fachliteratur, Gebrauchstexten und gesprochener Sprache – insgesamt ungefähr 500 Millionen Wörter – soll im Internet unter anderem ein umfassendes Verzeichnis der Kollokationen entstehen. In ihm lässt sich auch deren Bedeutungswandel im Laufe der Zeit nachvollziehen – ein Aspekt der etwa für die Praxis des Übersetzens von großer Bedeutung ist.

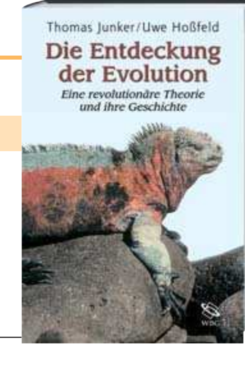
Der vierte aus Deutschland stammende Preisträger, der Biophysiker Josef Käs (39), studierte und promovierte an der Technischen Universität München. Zuletzt leitete er seit 1996 eine eigene Forschungsgruppe an der Universität von Texas in Austin. Mit einem selbst entwickelten Lasergerät versucht Käs die komplexen elastischen Eigenschaften des Cytoskeletts von Zellen zu vermessen. Änderungen in diesem höchst wandelbaren Polymernetzwerk gehen meist auch mit Änderungen der Zellfunktionen einher. Daher könnten sich Krebszellen schon frühzeitig durch abweichende elastische Eigenschaften verraten. Dieses nachzuweisen scheitert jedoch bislang noch an zu mühseligen oder an unausgereiften Verfahren. Josef Käs möchte deshalb mit seinen Forschungen auch eine Grundlage für neue Methoden in der Krebsdiagnostik schaffen.



Josef Käs

Ob die deutschen Wissenschaftler und die restlichen Preisträger in Deutschland langfristig heimisch werden, muss die Zeit zeigen. Christiane Fellbaum etwa behält ihre Stelle in Princeton, eine Rückkehr für immer plant sie nicht. Auch bleibt zu fragen, ob die positive Signalwirkung des Wolfgang-Paul-Preises nicht allzu schnell verpufft. Denn so schnell wird es nicht wieder wie im Falle der lukrativen UMTS-Lizenzen Milliarden vom Himmel regnen. ■

Alexander Pawlak *ist freier Wissenschaftsjournalist in Marburg.*



BIOLOGIEGESCHICHTE

Thomas Junker und Uwe Hoßfeld

Die Entdeckung der Evolution

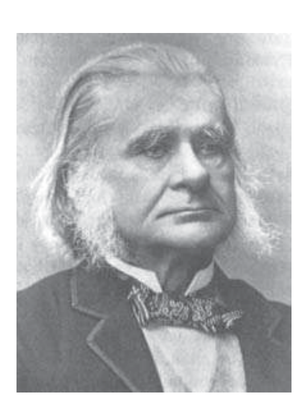
Eine revolutionäre Theorie und ihre Geschichte

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2001.
264 Seiten, € 30,16

Alle kennen die Evolutionstheorie. Zumindest assoziieren wir mit diesem Namen in der Regel zwei Dinge: Sie ist das herrschende Paradigma der modernen Biologie und Charles Darwin (1809–1882) ihre prominenteste Figur. Die Fülle der Literatur zu seiner Person und zu seinem Werk „On the Origin of Species" hat den Eindruck hinterlassen, dieses Buch habe die Welt in einem revolutionären Akt aus den Angeln gehoben: Am 24. November 1859 hörte sie plötzlich auf, eine göttliche Schöpfung zu sein. An deren Stelle trat die schnöde Wirklichkeit biologischer Mechanismen, allen voran die natürliche Selektion.

Aber Darwin hatte Vordenker, und seine Vorstellung in der Mitte des 19. Jahrhunderts unterscheidet sich grundlegend von einer modernen Evolutionstheorie, wie sie heute die meisten Biologen teilen.

Eine Geschichte der Evolutionstheorie wird daher ansetzen müssen an den sich wandelnden Inhalten des Begriffs Evolution. In seiner weitesten (biologischen) Definition meint das Wort zunächst nicht mehr, aber auch nicht weniger als einen Prozess, in dem neue Lebensformen entstehen können und der nicht auf einen göttlichen oder mythischen Urheber zurückgeht. In diesem Sinne beginnt die Geschichte evolutionärer Vorstellungen bereits bei den Griechen, und sie reicht bis zur synthetischen Evolutionstheorie der heutigen Biologie.



Der Zoologe und vergleichende Anatom Thomas Henry Huxley (1825–1895) war ein Freund Darwins und vehementer Streiter für dessen Ideen.

Diese Geschichte ist nun längst nicht mehr so bekannt. Die beste Einführung und bis heute das Standardwerk zu diesem Thema stammt von dem irischen Wissenschaftshistoriker Peter J. Bowler. Sein Buch „Evolution. The History of an Idea" (1984) ist allerdings nur auf Englisch verfügbar. Deshalb ist der vorliegende Überblick über dieses zentrale Kapitel der Biologiegeschichte begrüßenswert. Die Autoren sind Wissenschaftshistoriker in Tübingen und Jena und haben zu vielen Themen des Buches bereits wissenschaftlich gearbeitet. Das gilt insbesondere für die Entwicklung der modernen Evolutionstheorie im Deutschland des 20. Jahrhunderts.

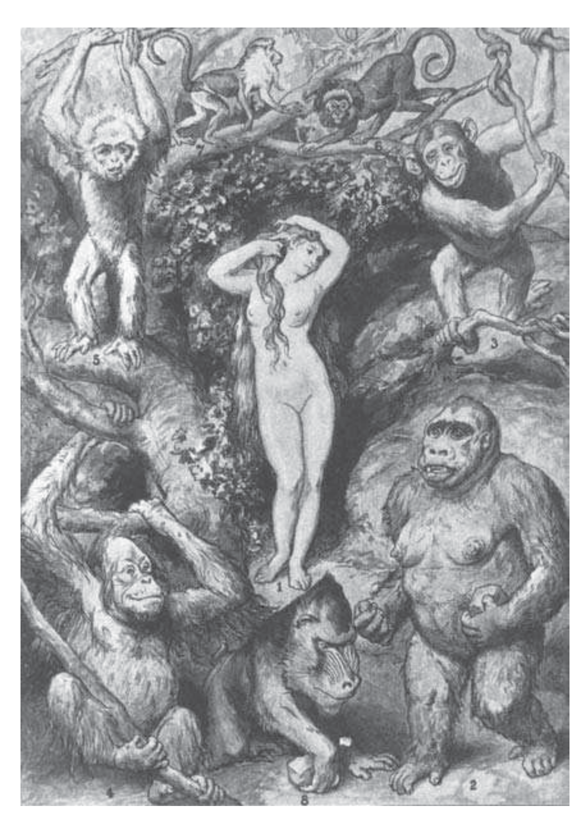
Das Buch ist eine fundierte Einführung in das Thema. Mit einem ausführlichen Sach- und Namenregister sowie einer umfassenden Bibliographie ermöglicht es einen selektiven Zugriff und gibt gleichzeitig Orientierung in der Fülle der weiterführenden Literatur.

Vier Etappen der Entwicklung werden skizziert, die sich um den zentralen Wendepunkt Charles Darwin gruppieren. Die ersten zwei Kapitel behandeln die „Vorläufer" – Antike, Aufklärung und frühe Entwicklungstheorien des 19. Jahrhunderts. Es folgt Darwin mit einem eigenen Kapitel. Anschließend werden in zwei Abschnitten die Diskussionen und Alternativkonzepte erörtert, die Darwins Programm auslöste. Die letzte Etappe gilt der Weiterentwicklung zur synthetischen Theorie im 20. Jahrhundert bis heute. Erst als es gelang, die zentrale Idee der natürlichen Selektion auf eine genetische Grundlage zu stellen, konnte sich die Idee der Evolution als wissenschaftliche Hypothese durchsetzen.

Das Faszinierende an diesem Buch und gleichzeitig sein großer Mangel ist, dass die Autoren zwar einen historischen Bogen schlagen, aber ihren Gegenstand nicht aus der Geschichte, sondern von der Gegenwart her entwickeln.

Das zeigt sich bereits am Aufbau des Buches. Junker und Hoßfeld geben in der Einführung einen Überblick über diverse Spielarten von evolutionären Vorstellungen, wie sie sich heute unterscheiden lassen – Ursprungstheorien, typologische Theorien, Abstammungstheorien und so weiter. Mit diesem Wissensstand schicken sie den Leser dann in die verschiedenen Epochen. Auf dem Weg bis zu Darwin werden sie nicht müde zu wiederholen, dass zum Beispiel weder Empedokles im 5. Jahrhundert vor noch Georges de Buffon im 18. Jahrhundert nach Christus „echte" Evolutionsvorstellungen entwickelten. Na schön; aber eigentlich hätte der Leser gern gewusst, warum Buffon Mitte des 18. Jahrhunderts dachte, was er dachte, und warum dies für seine Zeit so außergewöhnlich und für ihn so gefährlich war. Weil sie sich allerdings auf eine Ideengeschichte festgelegt haben, können die Autoren nur sehr rudimentär auf solche Fragen eingehen. Das komplizierte Zusammenspiel einer wissenschaftlichen Idee mit der Zeit, die sie hervorbringt, bleibt deshalb an vielen Stellen unklar. Besonders in der Darstellung von Darwin im 19. Jahrhundert und der deutschen Evolutionstheoretiker im 20. Jahrhundert fällt schwer ins Gewicht, dass die kulturgeschichtlichen Kontexte, Viktorianismus bzw. Nazi-Diktatur, nahezu ausgeblendet bleiben.

Der Leser fühlt sich daher oftmals an einen Enzyklopädie-Artikel erinnert, der ihn von einem Ereignis zum nächsten treibt. Er bekommt einen Überblick über die wichtigen Namen und Konzepte in der Geschichte der Evolutionsidee. Aber so richtig verstanden, was alle diese Ideen zu Geschichte macht, hat er nicht.

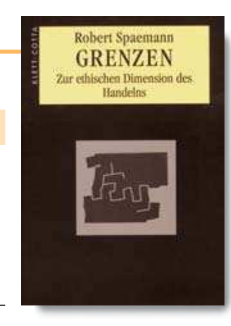


Apotheose des Entwicklungsgedankens. Zeichnung von Gabriel von Max und Ernst Haeckel

Janina Wellmann

Die Rezensentin ist Historikerin und promoviert derzeit am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin über die Rolle der Bilder in der Naturgeschichte um 1800.

PHILOSOPHIE



Robert Spaemann

Grenzen

Zur ethischen Dimension des Handelns

Klett-Cotta, Stuttgart 2001. 559 Seiten, € 35,02

Robert Spaemann ist als engagierter und streitbarer Wertkonservativer bekannt, und als solcher erweist er sich auch in dieser Aufsatzsammlung zur praktischen Philosophie, in der fast fünfzig Beiträge aus der Zeit von 1960 bis 2000 versammelt sind.

Der erste Teil des Buches enthält Beiträge zu Grundfragen der Ethik, etwa zur Moralbegründung, zum Begriff der Menschenwürde und zum Verhältnis von Natur und Recht. Spaemann argumentiert dabei vor allem in kritischer Abgrenzung zur utilitaristischen Ethik, für welche die Förderung des „größten Glücks der größten Zahl" das Kriterium des moralisch richtigen Handelns ist. Ihr wirft er vor, grundlegende Moralvorstellungen zu funktionalisieren, also einer universalen Optimierungsstrategie zu opfern. So werde insbesondere die Unbedingtheit und Unantastbarkeit der Menschenwürde in Frage gestellt, wenn diese zum Teil eines Optimierungsprogrammes gemacht werde. Stattdessen versucht Spaemann, die Personenwürde in der „Natur", das heißt einer nicht mehr hinterfragbaren und nicht mehr rechtfertigungsbedürftigen Normalität, zu fundieren.

Im zweiten Teil des Buches widmet sich Spaemann „Themen der Zeit" – von der Atombewaffnung über den Schwangerschaftsabbruch und die Sterbehilfe bis hin zur Legitimität technischer Eingriffe in die Natur und der Erziehung. Auch hier wendet er sich gegen die Funktionalisierung menschlichen Lebens und die Erosion grundlegender Moralvorstellungen. Den unkontrollierbaren Einsatz atomarer Kampfmittel als *ultima ratio* der Konfliktlösung verwirft er ebenso als unsittlich wie die Manipulation oder Herstellung menschlicher Existenz durch neue Technologien wie Präimplantationsdiagnostik oder Klonen.

Deutlich nimmt Spaemann auch gegen die „Seuche der Abtreibung" und für das Lebensrecht der Ungeborenen Stellung. Er verteidigt die Unbedingtheit des Tötungsverbots gegen die von utilitaristischen Autoren vertretene These, dass Sterbehilfe, auch aktive, zur Minimierung unerträglichen Leidens legitim sein kann. In einer solchen Infragestellung des Euthanasie-Tabus sieht Spaemann den ersten Schritt in eine „Euthanasie-Gesellschaft", die sich der Schwachen und Behinderten auf bequeme Weise durch Tötung entledigt.

Utilitaristen sind nicht Leute, die …

Um dieser Gefahr vorzubeugen, müsse man darauf verzichten, Leidbeseitigung zum obersten Wert zu machen.

Spaemanns Auseinandersetzung mit dem Utilitarismus ist alles andere als fair oder vorurteilsfrei. Nicht selten entstellt er diese philosophische Richtung durch suggestive und emotional gefärbte Wortwahl zu einer groben Karikatur, etwa wenn er behauptet, der Utilitarist Peter Singer betrachte Kinder im ersten Lebensjahr als „Freiwild", das, ebenso wie geistig Behinderte und Altersschwache, „prinzipiell zur Tötung freigegeben" und nötigenfalls „beiseite zu räumen" sei. Der Utilitarismus mag falsch sein, aber Utilitaristen



WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Jacques Brunschwig und Geoffrey Lloyd (Hg.)

Das Wissen der Griechen

Eine Enzyklopädie

Aus dem Französischen von Volker Breidecker et al.
Wilhelm Fink, München 2000. 916 Seiten, € 75,67

Wer in diesem Buch die herkömmlichen Weisheiten über die Anfänge der Wissenschaft, die Ursprünge der Philosophie und des abendländischen Denkens erwartet, sieht sich getäuscht. Aber auf durchaus angenehme Weise.

Die Herausgeber wollen in ihrem Buch „den Griechen dabei zusehen, wie sie sich selbst zusehen", wie sie dachten, handelten und planten. Das ist den beiden Historikern – aus Paris der eine, aus Cambridge der andere – mit Unterstützung von 45 weiteren Autoren aus Frankreich, Großbritannien, Italien und den USA sehr gut gelungen. Ihre neuartige Konzeption verdient höchstes Lob, ebenso wie die ausgezeichnete Arbeit der Übersetzer.

Gegliedert ist das bilderlose Buch – es gibt lediglich eine Zeittafel und zwei Übersichtskarten – in vier Kapitel. Das erste, „Philosophie", beschreibt zunächst den volkstümlichen und mythischen Hintergrund, vor dem sich philosophische Gedankengänge zu entwickeln begannen. Von diesen ersten Erkenntnisprozessen bis zur Herausbildung eines klaren wissenschaftlichen Denkens war es ein weiter Weg. Den Autoren gelingt es, in manchmal weitschweifiger, aber eindrucksvoller Darstellung die antike Sichtweise der Philosophie zu veranschaulichen, die sich erheblich von der heutigen unterscheidet.

Im zweiten Kapitel, „Politik", stehen nicht etwa die politischen Instrumente und Institutionen selbst im Vordergrund, sondern – dem Grundgedanken dieser Enzyklopädie folgend – deren Rechtfertigung und das Nachdenken über sie: die vielfältigen Aspekte politischen Handelns und Denkens etwa, oder das Spannungsfeld zwischen der erklärten Ideologie und der Praxis des staatsbürgerlichen Lebens.

Das dritte Kapitel, „Forschung und Wissenschaft", beginnt mit einer zusammenfassenden Darstellung der institutionellen und begrifflichen Voraussetzungen für einen – auch nach modernen Kriterien – wissenschaftlich fundierten Erkenntnisgewinn. Es folgen 15 Artikel über einzelne Wissensgebiete, von „Astronomie" über „Harmonik", „Logik", „Physik" und „Poetik" bis hin zur „Theorie der Sprache".

Ebenfalls alphabetisch, wie in Enzyklopädien üblich, sind die „Denker und geistigen Strömungen" des Schlusskapitels sortiert. Die Auswahl der Gelehrten und Denkschulen wirkt etwas eigenwillig. Doch Querverweise am Ende jeder Einzeldarstellung und ein ausführliches Namen- und Sachregister am Ende des Buches verweisen auch auf Forscher und Werke, denen kein eigener Beitrag gewidmet ist.

Für wen eignet sich nun diese Enzyklopädie? Für den schnellen Leser gewiss nicht. Wer aber bereit ist, die neuartige Herangehensweise der Autoren zu akzeptieren und immer wieder im Buch zu schmökern, dem wird sich ein ungewohntes und vielfältiges Bild des griechischen Wissens erschließen.

Uwe Reichert

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

sind nicht, wie Spaemann hier suggeriert, Leute, die mit leichter Hand und geradezu lustvoll Tötungslizenzen vergeben.

Der Utilitarismus widerspreche unseren Gerechtigkeitsvorstellungen; er führe zu einer Überforderung des moralischen Akteurs; er müsse die Glücksmaximierung auch von Sadisten und KZ-Wächtern auf Kosten der Opfer zulassen, ja empfehlen: Diese Vorwürfe sind nicht neu, und es gibt vielfache Entgegnungen auf sie, etwa in Henry Sidgwicks „Methods of Ethics" oder in „Moral Thinking" von Richard Hare. Dass Spaemann diese – sicherlich ihrerseits kritikwürdigen – Verteidigungsversuche des Utilitarismus fast vollständig ignoriert, ist bedenklich.

… lustvoll Tötungslizenzen vergeben

Insofern er seine Thesen nicht in Form einer Kritik des Utilitarismus formuliert, beruft er sich zu ihrer Begründung auf basale „sittliche Intuitionen". Da er dabei zum einen die Einheit von Ethik und Metaphysik voraussetzt, zum anderen Metaphysik als eine „Philosophie des Absoluten" auffasst und als solche dem Atheismus entgegensetzt, wurzeln diese Intuitionen letztlich in religiösen Überzeugungen – Spaemann macht aus seiner Bindung an die katholische Kirche keinen Hehl. Der Atheismus, meint er daher konsequent, entziehe etwa „dem Gedanken der Menschenwürde definitiv seine Begründung und so die Möglichkeit theoretischer Selbstbehauptung". Nur sind sowohl seine Auffassungen zur Metaphysik als auch seine religiösen Grundüberzeugungen alles andere als selbstverständlich; wer sie nicht ohnehin teilt, kann sie kaum für akzeptabel oder gar allgemein verbindlich halten.

Spaemann möchte die sittlichen Grundüberzeugungen, die als Maßstab moralischen Handelns fungieren sollen, keiner weiteren Kritisierbarkeit mehr ausgesetzt wissen, jedenfalls „außerhalb des geschützten Raums der Wissenschaft" – und das vor allem ist es, was ihn von seinen Hauptgegnern unterscheidet. Denn ein Utilitarist würde behaupten, dass wir die von Spaemann verteidigten Intuitionen etwa hinsichtlich des Lebensschutzes zwar ausbilden und uns aneignen sollten, aber bereit sein müssen, sie in Grenzfällen auch kritisch zu überprüfen und nötigenfalls zu korrigieren. Für Spaemann hingegen gibt es Grenzen des Hinterfragens moralischer Selbstverständlichkeiten außerhalb der akademischen Diskussion; auf diese Grenzen spielt der Buchtitel an. Wer sie überschreitet, der verdiene nicht Argumente, sondern Zurechtweisung. Um dies zu bekräftigen, schreckt Spaemann vor dem Einsatz von Denunziationsrhetorik nicht zurück, so etwa, wenn er das Infragestellen moralischer Selbstverständlichkeiten außerhalb des Seminarraumes mit Himmlers Lob auf die Moralität der Judenmörder vergleicht.

Gleichwohl geht man aus der Lektüre des Buches belehrt und mit Gewinn hervor. Spaemann verzichtet auf unnötigen Jargon, schreibt in durchweg klarem und gut verständlichem Stil und spart nicht mit Beispielen. Von der einleuchtenden Kritik des ethischen Relativismus, den erhellenden Ausführungen über naturteleologisches Denken oder der Kritik am Friedensbegriff der Friedensbewegung – um nur einige Beispiele zu nennen – kann man auch dann profitieren, wenn man Spaemann in seinen Hauptthesen nicht folgt. Noch größer allerdings wäre der Gewinn aus der Lektüre gewesen, wenn Spaemann die Argumente seiner Gegner zur Kenntnis genommen und sich auf eine sachliche Auseinandersetzung mit ihnen eingelassen hätte.

Oliver Hallich

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent für Philosophie an der Universität Düsseldorf.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Tom Shachtman

Minusgrade – Auf der Suche nach dem absoluten Nullpunkt

Eine Chronik der Kälte

Aus dem Amerikanischen von Susanne Warmuth.
Rowohlt Taschenbuch-Verlag, Reinbek 2001. 320 Seiten, € 10,17



Der amerikanische Wissenschaftsautor Tom Shachtman beleuchtet in seinem Buch sowohl die Wissenschaft als auch die Technik von Kälte und Kühlung vom 17. Jahrhundert bis heute. Die Schilderung wissenschaftlicher Kontroversen sowie die Charakterisierung bedeutender Wissenschaftler kommen dabei nicht zu kurz. Obwohl das Buch das Hauptgewicht auf die historischen Aspekte legt, werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen meist deutlich und stets fehlerlos erklärt.

Der Anfang der Experimente mit der Kälte liegt noch in der vorwissenschaftlichen Zeit. Der Holländer Cornelis Drebbel, der am englischen Hof als Magier tätig war, ist zu Beginn des 17. Jahrhunderts der Inbegriff des mittelalterlichen „Wissenschaftlers" – er gibt seine Methoden, die er dem König eindrucksvoll mit der Kühlung einer ganzen Kathedrale vorführt, nicht bekannt. So kann man ihm heute nur mit Deutungen seiner ungenauen Schriften auf die Spur kommen.

Mit dem Beginn der empirischen Wissenschaft verschwindet diese Geheimnistuerei. Im Bereich der Kälteforschung markiert insbesondere der Engländer Robert Boyle, dessen Name im Boyle-Mariotte'schen Gesetz der Wärmelehre fortlebt, diesen Paradigmenwechsel. Ganz nebenbei vermittelt Shachtman hier die Grundlagen der Erkenntnistheorie und damit der heutigen exakten Naturwissenschaften.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die Caloricum-Theorie, nach der ein gewisser Wärmestoff für die Wärme oder Kälte eines Gegenstands verantwortlich ist, vor allem durch die Ideen von James Prescott Joule (1818–1889) und Julius Robert Mayer (1814–1878) widerlegt. Shachtman macht diese ebenso wie andere Geschichten durch die persönliche Charakterisierung der beteiligten Forscher lebendig und begreiflich.

Bevor sich der Leser in die Höhen der 1824 von Sadi Carnot begründeten Thermodynamik begibt, kann er sich noch mit Geschichten über die Entwicklung von Kühlboxen und den Handel mit Natur-Eis Ende des 19. Jahrhunderts erholen. Dann aber liefert Shachtman präzise Erklärungen bis hin zu den drei Hauptsätzen der Thermodynamik, die von Mayer, Rudolf Clausius, Hermann von Helmholtz, Walther Nernst und William Thomson aufgestellt wurden. Faszinierend und zugleich leicht nachvollziehbar sind die Gedankengänge, denen zufolge ein absoluter Nullpunkt existieren muss.

Ebenso beeindruckend wird der wissenschaftliche Wettstreit dargestellt, der Ende des 19. Jahrhunderts um die Verflüssigung der Gase und damit das Erreichen immer tieferer Temperaturen tobte. Mit der Entdeckung der Supraleitung beginnt schließlich die moderne Tieftemperaturforschung im letzten Jahrhundert, die mehrere nobelpreiswürdige Erkenntnisse erbrachte. ▶

5×5 Test® Sachbuch Top Ten Januar 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 21. Oktober 2001 bis 1. Januar 2002).

1. **Friedrich Naumann** – 23 Punkte

Vom Abakus zum Internet
Die Geschichte der Informatik
Primus, 287 Seiten, € 30,16

2. **David Burnie** – 23
Tiere. Die große Bildenzyklopädie mit über 2000 Arten
Dorling-Kindersley, 624 Seiten, € 50,11

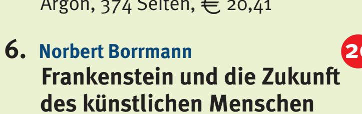
3. **Peter Häußler** – 22

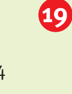
Donnerwetter – Physik!
Wiley-VCH, 377 Seiten, € 24,90

4. **Geoffrey F. Miller** – 22

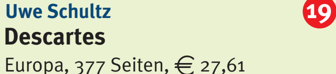
Die sexuelle Evolution
Spektrum Akademischer Verlag, 576 Seiten, € 30,62

5. **Robert Marantz Hening** – 21
Der Mönch im Garten.
Die Geschichte des Gregor Mendel und die Entdeckung der Genetik
Argon, 374 Seiten, € 20,41

6. **Norbert Borrmann** – 20

Frankenstein und die Zukunft des künstlichen Menschen
Diederichs, 368 Seiten, € 20,50

7. **Marc D. Hauser** – 19

Wilde Intelligenz
C. H. Beck, 378 Seiten, € 24,54

8. **Robert L. Wolke** – 19
Was Einstein seinem Friseur erzählte
Naturwissenschaften im Alltag
Piper, 352 Seiten, € 18,42

9. **Uwe Schultz** – 19

Descartes
Europa, 377 Seiten, € 27,61

10. **Gina Kolata** – 19

Influenza
S. Fischer, 351 Seiten, € 20,41

Leider wird die moderne Physik im letzten Teil des Buches etwas knapp und holprig erklärt. Ebenso schade ist es, dass die Funktionsweise eines Kühlschranks nie dargestellt wird. So ergibt dieses Panoptikum der Geschichte der Thermodynamik auch kein Kompendium der Tieftemperaturphysik.

Dennoch wird das Buch seinem Untertitel voll und ganz gerecht. Es zeichnet ein detailliertes und differenziertes Bild der Wissenschaft, erläutert physikalische Begriffe und Konzepte klar und korrekt; kleinere Mängel können die Qualität nicht ernstlich beeinträchtigen. Eine ausführliche Bibliographie, ein guter Index sowie eine Zeittafel runden das Werk ab. Mit einem Glossar sowie Abbildungen einiger Forscher oder auch Apparaturen wäre das Buch vollständig.

Markus Mathys

Der Rezensent studiert interdisziplinäre Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

TECHNIKSOZIOLOGIE



Rolf Krieg

Risiken der Technik

Ein kritischer Dialog über neue, am Menschen orientierte Denk- und Lösungsansätze

Raabe, Stuttgart 2000. 172 Seiten, € 18,30

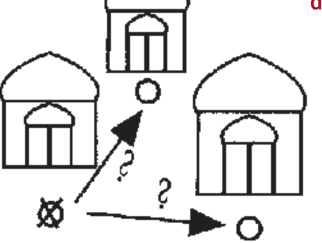
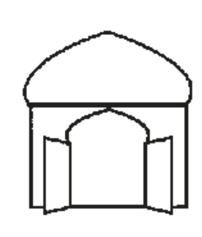
Während der Kernenergiedebatte sind wir bis zum Überdruss von väterlichen Figuren traktiert worden, die nicht nur die Wahrscheinlichkeit eines kerntechnischen Unfalls mit aberwitzig vielen Nullen hinter dem Komma bezifferten, sondern uns auch vermittelten, wir hätten sowieso keine Ahnung von der Sache und sollten die Sorge um die Sicherheit getrost den Experten überlassen.

Ich gestehe, der Tonfall des vorliegenden Buches hat üble Erinnerungen an diese Besserwisser in mir erweckt. Zu Unrecht! Rolf Krieg weiß es wirklich besser, denn er war langjähriger Leiter der Abteilung für Mechanik im Institut für Reaktorsicherheit des Forschungszentrums Karlsruhe und zeitweilig auch Vorsitzender der Reaktorsicherheitskommission. Mit 62 Jahren ist er über jeden Verdacht erhaben, er wolle uns seiner Karriere zuliebe einen Bären aufbinden. Ohne Zweifel kann er die Risiken der Kerntechnik besser einschätzen als die meisten Zeitgenossen, und ohne Zweifel ist es für seinesgleichen schwer erträglich, wenn nicht ihr Expertenurteil, sondern der Widerwille der ahnungslosen Bevölkerungsmehrheit den Ausschlag gibt bei der Entscheidung für den Ausstieg aus der Kernenergie.

In seinem ehrenwerten Bemühen, über den Dingen zu stehen, vertritt Krieg diese Position nicht selbst, sondern legt sie Adam in den Mund, einem von drei Partnern eines fiktiven Gesprächs. Dessen Widerpart Benno zeichnet er ohne den geringsten Versuch der Herabsetzung so, dass ein Kernenergiekritiker sich darin wiederfinden könnte; Lise, die dritte in der Runde, übernimmt die Moderation des Gesprächs und die Synthese der Argumente.

In mehreren Gesprächsrunden klärt uns der Autor über die Bedeutung von Wahrscheinlichkeitsberechnungen im Allgemeinen und von Risikoabschätzungen im Besonderen auf, zitiert gängige Fehleinschätzungen wie die beim notorischen Ziegenproblem und präsentiert uns die Erkenntnisse der Soziologen über das Verhalten von Laien: Sie unterschätzen die Risiken des Alltags und überschätzen die Risiken dessen, was sie nicht kennen – aber nur mäßig.

Aus dem Straßenverkehr gibt es die Erfahrung des „Risikothermostaten“: Die Leute setzen die Vorzüge von Sicherheitsgurt, ABS und Airbag nicht etwa ein, um das Unfallrisiko zu mindern, sondern um schneller zu fahren! Wegen der breiten Erfahrungsbasis – Autofahren ist alltäglich, und Unfälle kommen häu-

Eine andere Version des Ziegenproblems: Saddam Hussein wird verdächtigt, in einem seiner zehn Paläste Waffen zu verstecken. Die UNO-Inspekteure fordern Zutritt zu einem der Paläste, Saddam öffnet daraufhin einen anderen. Sollen die Inspekteure dann ihre Wahl revidieren?

fig vor – kommen sie zu einer zuverlässigen Einschätzung des Risikos und stellen ihr Verhalten so ein, dass ein von ihnen als akzeptabel angesehenes Risikoniveau eingehalten wird. Anders ist nicht zu erklären, warum die Einführung von Vorschriften wie Gurt- und Helmpflicht einen so mageren Effekt hatte.

In der Kerntechnik liegen die Dinge ganz anders. Ausgerechnet die bislang sehr geringen Unfallzahlen sind es, die uns an einer Abschätzung des Risikos aus Erfahrung hindern. In dieser Situation gilt der allgemeine ethische Grundsatz, dass der Fachmann zurückstecken muss, wenn es ihm nicht gelingt, den Laien zu überzeugen – was eben um so schwieriger ist, je weniger greifbare Erfahrungen vorliegen und je undurchschaubarer die Technik ist. Rolf Krieg versäumt nicht, die Risiken eines Verzichts auf Kernenergie aufzuzeigen: Zwangsläufig müsse sich der Verbrauch konventioneller Brennstoffe erhöhen und damit der Treibhauseffekt verstärken. Aber auch zu dieser Position bringt er immerhin die Gegenargumente.

Insgesamt eine gut geschriebene, von ehrlichem Bemühen um Fairness getragene Darstellung des aktuellen Diskussionsstandes zu Sicherheit und Risiko technischer Einrichtungen.

Ein Kernforscher liefert Argumente für den Atomausstieg

Der Autor konnte kaum ahnen, dass sein Werk Ende 2001 besondere Aktualität gewinnen würde. Die Betreiber baden-württembergischer Kernkraftwerke haben offenbar jahrelang systematisch Sicherheitsvorschriften missachtet, und zwar nicht, weil sie alle lebensmüde wären, sondern weil sie sich verhalten haben wie Autofahrer: In der Überzeugung, es besser zu wissen und das Risiko einschätzen zu können, haben sie ihr Verhalten auf ein von ihnen selbst für akzeptabel gehaltenes Risikoniveau eingestellt.

Ein solches Verhalten macht nicht nur den Unfallwahrscheinlichkeits-Berechnungen mit ihren vielen Nullen zu Makulatur. Sondern die Betreiber haben sich bei ihrer Risikoeinschätzung auch in trügerischer Gewissheit gewiegt: Bei den bisher geringen Unfallzahlen lassen sich „keine verlässlichen Aussagen zur Häufigkeit und zum Risiko ableiten“, sagt sogar Adam, der Technikbegeisterte.

Im Lichte dieser Nachrichten liefert das Buch ziemlich handfeste Argumente für einen Atomausstieg – was der Autor schwerlich beabsichtigt hat.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

WELTWIRTSCHAFT



Erich Becker-Boost, Ernst Fiala

Wachstum ohne Grenzen

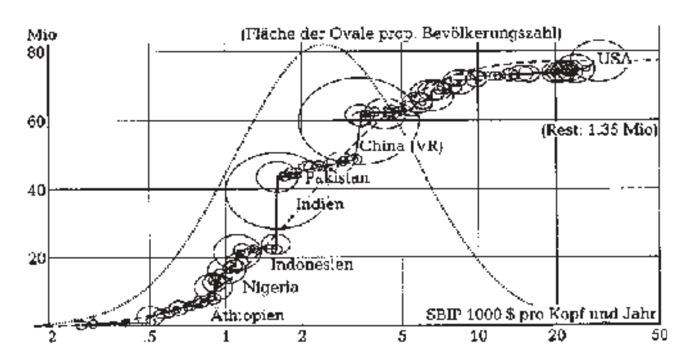
Globaler Wohlstand durch nachhaltiges Wirtschaften

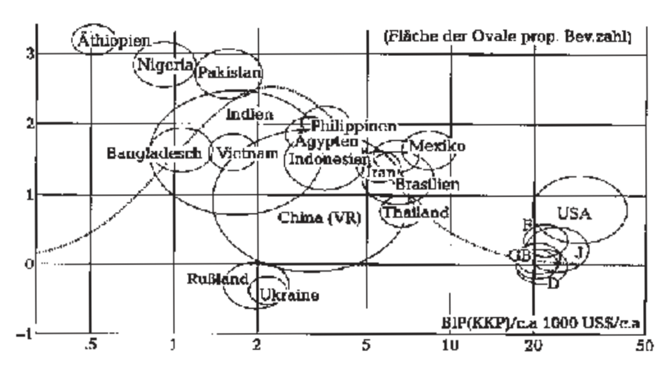
Springer, Wien 2001. 430 Seiten, € 32,21

Wirtschaftswachstum verbessert nahezu alle Lebensbedingungen. Deshalb muss es weitergehen, um die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Probleme der Gegenwart zu lösen. Und es kann weitergehen, denn dank dem menschlichen Erfindungsgeist kann die Wirtschaft in Naturkreisläufe eingebunden werden, sodass keine Rohstoff- und Umweltprobleme entstehen. Störungen ökonomischen Fortschritts durch Finanzkrisen sind, wie alle anderen wirtschaftlichen, politischen und sozialen Konflikte auch, ein Problem der „global governance“, also letztlich ein Managementproblem, oder sie lösen sich durch das Wachstum der Wirtschaft von alleine.

Mit dem vorliegenden Buch, einem „Bericht an den Club of Rome“, wollen die Autoren dem Pessimismus vieler Studien des Club of Rome – allen voran das einflussreiche Buch „Die Grenzen des Wachstums“ von 1972 – einen wissenschaftlich begründeten „neuen Realismus“ entgegensetzen. Beide verfügen über reichlich Berufserfahrung in weltwirtschaftlichen Fragen: Erich Becker-Boost war jahrelang in internationalen Entwicklungs- und Finanzierungsorganisationen, darunter der Weltbank, tätig, Ernst Fiala war langjähriges Vorstandsmitglied der Volkswagen AG und ist derzeit Honorarprofessor an der Technischen Universität Wien.

Grundprinzip ihrer Untersuchung ist die Übertragung der Charakteristika biologischer Wachstumsprozesse auf alle ökonomischen und sozialen Phäno- ▶





„Sehr arme und sehr reiche Länder wachsen langsam, solche mit bescheidenem Wohlstand relativ schnell.“ Die linke Grafik (Bevölkerungszunahme in absoluten Zahlen im Jahre 1997 in 104 Ländern, kumuliert aufgetragen über dem Bruttoinlandsprodukt pro Kopf) scheint diese Theorie zu bestätigen; erst die angemessenere Darstellung rechts (relative statt absoluter Zunahme, nicht kumuliert) entlarvt sie als Selbsttäuschung.

mene. So wächst zum Beispiel eine Volkswirtschaft zunächst langsam, dann schneller, bis ihre Größe sich unter Verlangsamung des Wachstums einem Endwert nähert. Trägt man die Größe und ihre Wachstumsrate über der Zeit auf, so ergibt sich für die Größe eine so genannte S-Kurve, für die Wachstumsrate eine Glockenkurve (Bild oben).

In dieses Muster ordnen die Autoren nun zahlreiche ökologische, soziale und wirtschaftliche Probleme ein. Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, Bildung, Information, Mobilität, Energienutzung, Konflikte und persönliches Glück werden, geeignet quantifiziert, in Diagramme eingetragen, allerdings nicht über der Zeit, sondern über dem kaufkraftbewerteten Bruttoinlandsprodukt pro Kopf (SBIP), das damit zur erklärenden Variable gemacht wird. Zugleich unterstellen die Autoren mit dieser Betrachtungsweise, dass sich alle Bevölkerungsgruppen bei gleichem Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt ähnlich verhalten. Die Ergebnisse dieser Analyse dienen dann als Basis für Prognosen aller Art.

Die These vom ähnlichen Verhalten gleich reicher Staaten ist durch nichts belegt

Das ist problematisch, sowohl vom theoretischen Ansatz als auch von der empirischen Anwendung her. Die Autoren behaupten, dass Wachstum ein Merkmal nicht nur junger biologischer, sondern auch junger ökonomischer und sozialer Strukturen sei, ohne zu erklären, was unter einer „jungen“ Wirtschaft oder Gesellschaft zu verstehen ist, und vor allem ohne ihre Übertragung vom Biologischen ins Soziale zu rechtfertigen. Es ist keineswegs evident, dass sich das Muster genetisch gesteuerter Wachstumsprozesse auf Systeme übertragen lässt, deren Entwicklung durch die Entscheidungen von Individuen gestaltet wird.

Auch die Unterstellung, dass das SBIP und nur dieses die erklärende Variable (und damit fast so etwas wie die Ursache) für alle anderen betrachteten Phänomene sei, wird nicht gerechtfertigt. Eine solche Aussage kann grundsätzlich nicht aus der empirischen Analyse hervorgehen, denn diese liefert nur Korrelationen. Und die umgekehrte Kausalbeziehung ist in vielen Fällen durchaus plausibel. So kann eine niedrige Wachstumsrate der Bevölkerung eine Voraussetzung für ein höheres Pro-Kopf-Inlandsprodukt sein.

Es gibt auch andere Ursachen für Bevölkerungsveränderungen. So zeigen beispielsweise demografische Arbeiten, dass die Stellung der Frau in der Gesellschaft einen wesentlichen Einfluss auf die Geburtenrate ausübt. Dabei muss, wie das Beispiel des indischen Bundesstaates Kerala zeigt, keineswegs ein Zusammenhang zwischen dem Durchschnittseinkommen und der Stellung der Frau bestehen. Noch deutlicher wird die Fragwürdigkeit dieser Annahme bei dem behaupteten Zusammenhang zwischen der Zahl innerstaatlicher Konflikte und der Höhe des SBIP. Sollte es wirklich ein Wohlstandsniveau geben, das sich zum Führen von Bürgerkriegen besonders eignet – nicht zu wenig zum Kämpfen und noch nicht zu viel zu verlieren –, und sonst keinen wesentlichen Grund?

Hinzu kommt, dass die Autoren stets Querschnittsbetrachtungen anstellen, sie aber so interpretieren, als wären es Zeitreihen. Aber die Vergangenheit eines entwickelten Landes gibt kein besonders getreues Bild von der Gegenwart eines unterentwickelten. Hier hängt die Argumentation der Autoren an der These vom ähnlichen Verhalten gleich reicher Staaten – und die wird nicht belegt.

Häufig ist nicht nachvollziehbar, warum gerade eine S-Kurve oder Glockenkurve die beste Annäherung an die Punktewolken in den Diagrammen sein soll. Dies gilt für viele Einzeluntersuchungen. Mit einer Regressionsanalyse und statistischen Tests hätte man die Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse abschätzen können. Warum dieser Weg nicht beschritten wurde, bleibt unklar.

Neben diesen theoretischen und empirischen Arbeiten finden sich in der Studie weitere Untersuchungen zu spezifischen Rohstoff- und Umweltproblemen unserer Konsum- und Wirtschaftsweise sowie ethische Überlegungen zu den Folgen wirtschaftlichen Handelns. Becker-Boost und Fiala wollen damit zeigen, dass letztlich weder Rohstoffknappheiten noch Umweltprobleme existieren, da es für alle Rohstoffe geeigneten Ersatz gebe und Umweltprobleme durch neue Techniken gelöst werden könnten. Man müsse eben die künftige Entwicklung realistisch einschätzen und die Lösung im Rahmen einer marktwirtschaftlichen Wirtschaftsordnung suchen.

Das Buch wird seinem eigenen Anspruch auf eine realistische Einschätzung der künftigen Entwicklung nicht gerecht; zu schwerwiegend sind die oben angeführten Mängel. Was die allgemeine Sicht der Welt – optimistisch oder pessimistisch – angeht: Dafür geben die empirischen Fakten in jedem Falle wenig her. Und die Existenz rohstoffsparender und umweltfreundlicher Technologien allein ist noch kein Anlass für Optimismus. Denn es bleibt äußerst ungewiss, ob sich eine demokratisch verfasste Gesellschaft auch für deren Einführung entscheidet.

Frank Jöst

Der Rezensent ist Privatdozent am Alfred Weber-Institut der Universität Heidelberg.

Suchen Sie mit nach Außerirdischen!

Gibt es Intelligenz im fernen Weltall? Die Nasa darf für diese Frage kein Geld mehr ausgeben; aber die Suche (*search for extraterrestrial intelligence,* SETI) geht auf privater Basis weiter, und jeder Computer-Inhaber mit Internet-Verbindung darf mitsuchen.



Die an der Universität von Kalifornien in Berkeley ansässige SETI-Organisation macht aus dem Datenstrom, den das weltgrößte Radioteleskop in Arecibo (Puerto Rico) rund um die Uhr aus dem All erhorcht, handliche Häppchen (*work units*) und hält sie im Internet bereit. Wer will, lädt sich (http://setiathome.ssl.berkeley.edu/index.html) ein Programm auf seinen PC, das nur in den Leerlaufzeiten des Computers aktiv ist, einen „Bildschirmschoner" (*screensaver*). Dieser holt sich ein Häppchen, kaut es intensiv – etwa 18 Stunden lang – durch, liefert die Ergebnisse zurück, bekommt das nächste Häppchen und so weiter. Die Analyse soll Signale finden, die innerhalb von zwölf Sekunden an- und wieder abschwellen – in dieser Zeit durchquert ein Punkt der Himmelskugel das Blickfeld der ortsfesten Riesenschüssel – und von einer gewissen Regelmäßigkeit sind.

Die Beteiligung an dem Programm „SETI@home" ist überwältigend: 400 Millionen *work units* sind bisher erledigt. Die versammelte SETI-Rechenleistung ist zu jedem Zeitpunkt viermal so hoch wie die des weltschnellsten Superrechners. Auf jeden Amerikaner kommen 0,8 von amerikanischen Computern verarbeitete Häppchen (nach diesem Maßstab ist die Antarktis mit 46 Häppchen pro Einwohner das fleißigste Land der Welt). Die ursprünglich geplante Laufzeit von zwei Jahren ist verlängert worden.

Und wenn tatsächlich ein gefundenes Signal die zahlreichen Echtheitstests besteht? Dann erntet der Besitzer des findenden Computers Ruhm: ungefähr so unverdient wie bei einem Hauptgewinn im Lotto, aber weniger einträglich und vor allem weit unwahrscheinlicher. Es sind doch eher romantische Sciencefiction-Gefühle, die zu der – kaum Aufwand erfordernden – Teilnahme motivieren.

Christoph Pöppe

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

PREISRÄTSEL

Ähnliche Äcker

von Werner Hilger

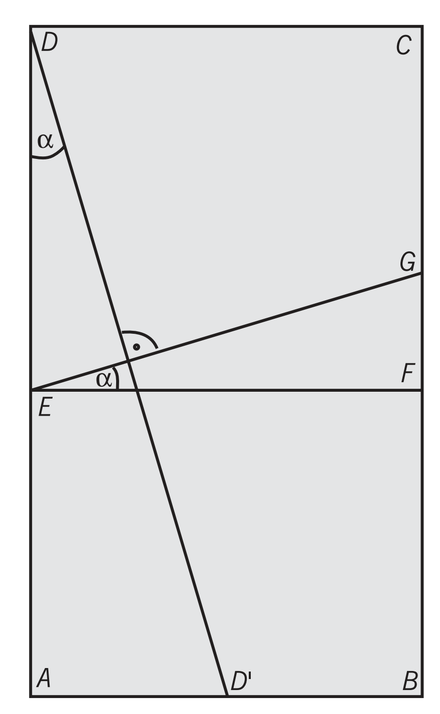
Jan bestellt seinen rechteckigen Acker, der ein Seitenverhältnis von 1 zu $\sqrt{2}$ hat (DIN-A4-Blatt), nach der Dreifelderwirtschaft. Er teilt ihn in drei dem ganzen Acker ähnliche Parzellen auf. Zwei davon sind notwendigerweise kongruent, was Jan langweilt.

Welches Seitenverhältnis muss ein Acker haben, der sich in drei dem Acker selbst ähnliche, aber unterschiedliche Rechtecke teilen lässt?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn Bildkalender „Wege durch das All". Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. Januar 2002, eingehen.

Lösung zu „Das gefaltete Blatt" (November 2001)



Die gesuchte Rechteckseite ist 144 Zentimeter lang.

Thomas Pircher aus Landeck faltete das Blatt wieder auf (Skizze). Er verband *D* mit dem Mittelpunkt *D'* der Strecke $\overline{AB}$, auf welche die Ecke *D* zuvor gefaltet war. Diese Strecke steht senkrecht auf dem Falz *EG*. Der Winkel α zwischen *EG* und der Horizontalen *EF* ist gleich dem Winkel zwischen *DD'* und *DA*. Die Dreiecke *DAD'* und *EFG* sind somit ähnlich. Da $\overline{EG}$ und $\overline{AB}$ bekannt sind, genügt ein wenig Trigonometrie:

$$\cos\alpha = \overline{AB}/\overline{EG} \text{ und } \tan\alpha = \overline{AB}/(2\overline{DA}),$$

woraus sich $\overline{DA}$ zu 144 Zentimetern ergibt.

Die Gewinner der drei Spiele „Trememo" sind Hans-Martin Gabriel, Langgöns; Sandra Grininger, Linz (Österreich); und Hubert Fischer, Algund (Italien).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik" jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

EPCOS AG

Schnelle Ventile sparen Kraftstoff

Wer beim Dieselmotor heute noch eine behäbige Fahrweise assoziiert, hat die Entwicklung der letzten Jahre in der Automobilbranche verschlafen. Dass es sich vielmehr um den ökonomischsten und zugleich leisesten Verbrennungsmotor handelt, der auch an Dynamik seinem Benzin-Kollegen kaum mehr nachsteht, ermöglichen spezielle Einspritzsysteme für den Kraftstoff.

Dieser gelangt als feiner Nebel genau dann in den Zylinder, wenn der Kolben die Luft durch Verdichten auf eine Temperatur von mindestens 700 Grad Celsius erhitzt hat. Ältere Generationen von Dieselmotoren neigten zum Rußen und Nageln, denn die folgende Verbrennung verlief schlagartig und meist unvollständig. Abhilfe schaffte die so genannte Common-Rail-Technik: In der Zuleitung (*common rail*) herrscht ein Druck von bis zu 1600 Bar, sodass der Diesel sehr fein zerstäubt wird, wenn sich ein Düsenventil zu einem Zylinder öffnet. Je geringer die Tröpfchengröße, desto größer ist aber die gesamte Oberfläche des Kraftstoffs und desto effizienter und vollständiger wird er verbrannt. Hinzu kommt, dass die Verbrennung in mehreren Schritten erfolgen kann: Heutige Magnetventile spritzen pro Zündzyklus zweimal Diesel ein.

Noch schneller geht es, wenn die Ventile von Piezo-Keramiken geöffnet und geschlossen werden (siehe Stichwort). Auf Grund ihrer geringeren Masse und Trägheit reagieren mit solchen Stellelementen (fachlich „Aktuatoren“) ausgestattete Ventile dreimal so schnell wie herkömmliche, von Elektromagneten betätigte. Bis zu sechs Einspritzungen pro Zündzyklus wären also möglich.



EPCOS AG

Aus 349 Keramikschichten besteht dieses Piezo-Stellelement, das im Peugeot 307 die Einspritzventile betätigt.

Piezo-Aktuatoren für den Automobilbau produziert weltweit ausschließlich die EPCOS AG in München. Sie verwendet dafür Schichten spezieller keramischer Werkstoffe. Aus dem Auto-Bordnetz von 12 Volt erzeugt eine Elektronik von Siemens VDO Automotive Steuerspannungen von 160 Volt, die einen 80 Mikrometer dicken Aktuator um 0,11 Mikrometer strecken. Insgesamt 349 Keramikschichten werden übereinandergestapelt, sodass sich das schließlich 7 mal 7 mal 30 Millimeter große Bauelement insgesamt um 40 Mikrometer ausdehnt. Dies genügt, um eine feine Ventil-Nadel zu bewegen und so das Einspritzventil zu öffnen. Für das im Bauelement erforderliche elektrische Feld sorgen insgesamt 350 Elektroden. Wird Gleichspannung angelegt, so dehnen sich die Schichten aus. Wechselt man nun die Polungsrichtung, kehren die Schichten wieder in den Ausgangszustand zurück.

Als optimal erwiesen sich bislang kostspielige Elektroden aus Palladium und Silber, da Palladium eine sehr gute Kontaktierung zwischen den Keramiken und den Anschlussdrähten gewährleistet und Silber eine hohe Leitfähigkeit besitzt. Den Forschern von EPCOS ist es vor kurzem gelungen, ein weltweit einmaliges Verfahren zu entwickeln, das die Kontaktierung über das wesentlich kostengünstigere Kupfer ermöglicht. Wie? Betriebsgeheimnis!

Eine Milliarde Einspritzvorgänge sollte ein Piezo-Aktuator im Lauf seines „Lebens“ mindestens schaffen, pro Zündung bis zu fünf. Dies entspricht einer gefahrenen Strecke von über 330000 Kilometern. Der erste Automobilhersteller, der auf die flinken Bauelemente setzt, ist Peugeot: Im neuen Modell Peugeot 307 sind sie schon serienmäßig eingebaut. Tests haben ergeben, dass die exakte Arbeitsweise derart ausgestatteter Ventile den Kraftstoffverbrauch um bis zu 15 Prozent

Stichwort

Der Piezo-Effekt: Wie die französischen Physiker und Brüder Paul Jacques Curie (1855–1941) und Pierre Curie (1859–1906, Ehemann von Marie Curie) entdeckten, lässt sich an manchen Isolatorkristallen eine elektrische Spannung abgreifen, wenn man sie beispielsweise staucht; umgekehrt reagieren solche Werkstoffe mit einer freilich winzigen Längenänderung auf das Anlegen einer Spannung. Dieser Effekt entsteht, da Unsymmetrien im Gitteraufbau dieser Materialien die Ausbildung elektrischer Ladungsschwerpunkte zur Folge haben.

Das Unternehmen im Profil

Die EPCOS AG ist aus dem Joint Venture Siemens Matsushita Components hervorgegangen und notiert seit Oktober 1999 an den Börsen Frankfurt und New York. Am Hauptsitz in München sowie an Standorten in Europa, Asien/Pazifik, Nord- und Südamerika arbeiten derzeit über 13 000 Mitarbeiter. Das Unternehmen produziert Bauelemente für die Elektronik – angefangen bei Fernsehern, Videorekordern, Handys, Notebooks über Waschmaschinen und Windkraftanlagen bis zu Pkws und ICEs. Im Geschäftsjahr 1999/2000 erzielte EPCOS einen Umsatz von 1,86 Milliarden Euro und einen Gewinn von 240 Millionen Euro. Das Unternehmen kooperiert weltweit mit über 50 Universitäten und Forschungsinstituten.

Weitere Informationen unter *www.epcos.com*

senkt; entsprechend weniger Abgase werden freigesetzt. Zudem läuft die Verbrennung gleichmäßiger ab, der Motor arbeitet dementsprechend leiser.

EPCOS sieht seine Piezo-Aktuatoren nicht nur in der Automobilindustrie – auch wo Lacke und Pulver ausgebracht werden, sind Techniken gefragt, um die Dosierung und Zerstäubung zu optimieren. Darüber hinaus eignen sich solche Bauelemente zur Feineinstellung optischer Geräte, etwa zur Kamerafokussierung. ■

*Die Autorin **Ulrike Zechbauer** ist Wissenschaftsjournalistin in München.*



Piezo-Kristalle machen dieser Einspritzdüse Dampf.

Schwarze Löcher im Zahlenkosmos

Wird eine Zahlenfolge immer wieder neue Werte annehmen oder wird sie in einem Strudel enden, aus dem es kein Entrinnen gibt?

Von François Fricker

Niemand wird je eines der von den Kosmologen postulierten Schwarzen Löcher zu Gesicht bekommen. Denn ihre Gravitation ist derart gigantisch, dass selbst Licht verschluckt wird. Immerhin verraten sich die Schwerkraftfallen durch heftige Reaktionen ihrer Umgebung. Doch erst ab 1992 ist es mit Hilfe des Hubble-Teleskops gelungen, entsprechende Materiestrudel zu orten.

Mag diese Tatsache inzwischen zu einem soliden Allgemeinwissen gehören, so ist doch kaum bekannt, dass es auch im Zahlenkosmos Schwarze Löcher gibt. An die Stelle des Kraftgesetzes, das die Materie auf ihre Bahnen im Weltraum zwingt, tritt eine Iterationsvorschrift, nach der aus einer Zahl eine andere wird, aus dieser nach derselben Vorschrift wieder eine andere und so weiter. Die so entstehende Zahlenfolge ist in einem abstrakten Sinne so etwas wie die Bahn eines Teilchens; und gelegentlich enden alle solchen Bahnen in ein und demselben Punkt.

Die berühmte Collatz-Iteration – aus *n* wird *n*/2, wenn *n* gerade ist, sonst 3*n*+ 1 – kann sehr lange Zahlenfolgen erzeugen …

27 → 82 → 41 → 124 → 62 → 31 → 94 → 47 → 142 → 71 → 214 → 107 → 322 → 161 → 484 → 242 → 121 → 364 → 182 → 91 → 274 → 137 → 412 → 206 → 103 → 310 → 155 → 466 → 233 → 700 → 350 → 175 → 526 → 263 → 790 → 395 → 1186 → 593 → 1780 → 890 → 445 → 1336 → 668 → 334 → 167 → 502 → 251 → 754 → 377 → 1132 → 566 → 283

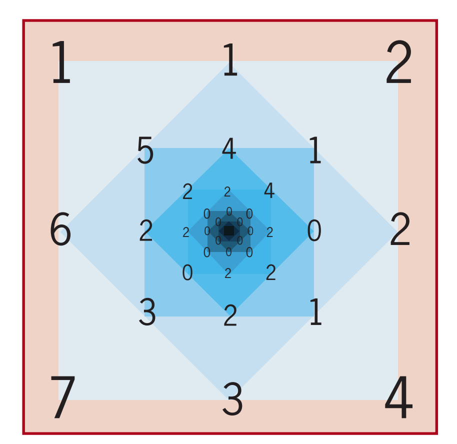
Das unter Kennern wohl am meisten zitierte Exemplar eines Schwarzen Lochs aus der Zahlenwelt wurde vor rund fünzig Jahren von dem legendenumrankten indischen Mathematiker Dattreya R. Kaprekar (1905–1986) entdeckt. Dabei geht es um diejenigen vierstelligen Zahlen, die nicht aus lauter gleichen Ziffern bestehen. Man stelle die Ziffern einer solchen Zahl derart um, dass die entstehende Zahl zuerst so groß und dann so klein wie möglich wird. Anschließend unterwerfe man die Differenz der so gewonnenen Zahlen der gleichen Prozedur und so fort. Im Falle der Zahl 3996 ergäbe das:

9963 – 3699 = 6264
6642 – 2466 = 4176
7641 – 1467 = 6174

Die Fortsetzung erübrigt sich, da nunmehr endlos die letzte der drei Rechnungen reproduziert wird. Kaprekar hatte bemerkt, dass man unabhängig vom Startwert spätestens nach sieben Schritten in der heute nach ihm benannten Konstanten 6174 hängen bleibt. Ein Beispiel für eine Zahl, die sich ihrem Absturz so lange wie überhaupt möglich widersetzt, ist 5472:

7542 – 2457 = 5085
8550 – 0558 = 7992
9972 – 2799 = 7173
7731 – 1377 = 6354
6543 – 3456 = 3087
8730 – 0378 = 8352
8532 – 2358 = 6174

So verblüffend dieses Phänomen auch erscheinen mag, für die Puristen unter den Mathematikern ist es wenig bemerkenswert. Der Grund: Die Aussage bezieht sich bloß auf die endliche und obendrein leicht überschaubare Menge der vierstelligen Zahlen. Wenn es sein müsste, könnte man sie mittels Brachialgewalt – also ohne jeden Scharfsinn – überprüfen, indem man eine vierstellige Zahl nach der anderen untersucht.



Aus einer Folge von vier natürlichen Zahlen mache man eine weitere derartige Folge, indem man den Betrag der Differenz zwischen jedem Glied und seinem Nachfolger bildet (als Nachfolger des letzten Gliedes gilt das erste). Nach einer gewissen Anzahl von Iterationen endet die Folge unweigerlich bei (0, 0, 0, 0).

Diffy, das Differenzenspiel

Unterdessen sind aber auch Schwarze Löcher aufgestöbert worden, die wirklich alle Zahlen in sich hineinziehen. Bei einem der schönsten ist der Ausgangspunkt ein Quadrat, in dessen Ecken völlig beliebige Zahlen platziert sind. Anschließend wird jede Seite mit den Differenzen der sie begrenzenden Zahlen beschriftet und damit ein neues Quadrat erzeugt. Mit diesem Quadrat wird der Prozess wiederholt und so weiter. Dabei stellt sich heraus, dass man völlig unabhängig von der anfangs getroffenen Wahl früher oder später in den Sog eines Schwarzen Lochs gerät – eines Quadrats mit lauter Nullen (Bild unten).

Dieser verblüffende Sachverhalt wurde über zehn Jahre vor Kaprekar von dem nicht weiter bekannten Italiener Emilio Ducci entdeckt und gleich darauf auch in aller Strenge begründet. Inzwischen sind Dutzende von Abhandlungen zu diesem Thema erschienen; im englischen Sprachraum ist das Spiel seit 1971 unter dem Namen „Diffy“ (für „Difference“) bekannt. Dabei wurde immer wieder untersucht, weshalb sich das Schwarze Loch meist schon in der sechsten Runde – oder noch früher – bemerkbar macht. Andererseits weiß man, dass es bei geeignetem Start beliebig lange dauern kann, bis die vier Nullen erscheinen.

Verallgemeinerte Quersummen

Bei einem erst 1989 entdeckten Schwarzen Loch betrachtet man die Teiler einer willkürlich ausgewählten Zahl und bildet die Summe aller ihrer Ziffern. Bei 21 wären das also 1, 3, 7 und 21, was zu $1+3+7+2+1=14$ führt. Nunmehr geht es analog weiter mit den Teilern 1, 2, 7 und 14, womit 14 in $1+2+7+1+4=15$ übergeht. Und schon sind wir in einem Schwarzen Loch angelangt, denn die Zahl 15 führt mit den Teilern 1, 3, 5 und 15 zu $1+3+5+1+5=15$. Erstaunlich ist, dass solchermaßen jeder nur erdenkliche Start früher oder später ebenfalls zu 15 führt, sich diese Zahl demnach als universelles Schwarzes Loch entpuppt.

Apropos jeder nur erdenkliche Start: Nehmen wir einmal das Ungetüm

850 → 425 → 1276 → 638 → 319 → 958 → 479 → 1438 → 719 → 2158 → 1079 → 3238 → 1619 → 4858 → 2429 → 7288 → 3644 → 1822 → 911 → 2734 → 1367 → 4102 → 2051 → 6154

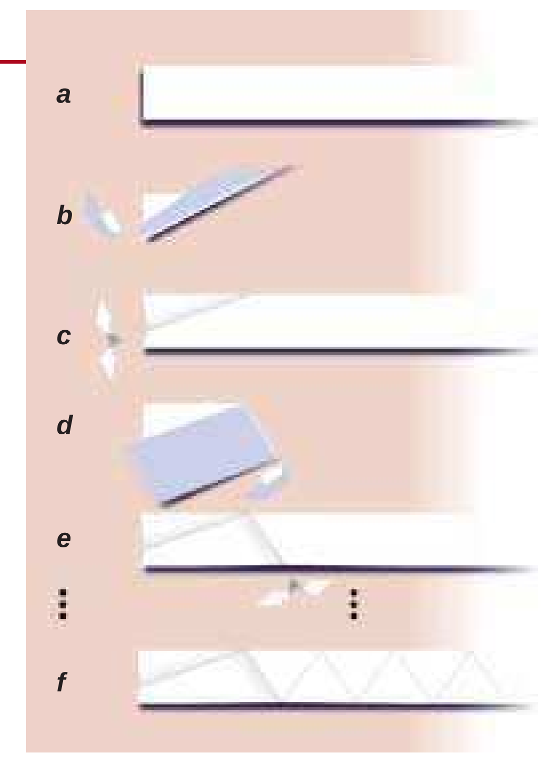
92 668 594 038 674 876 439 876 298 479 679 064. In diesem Fall konstatiert man 21 gerade und 14 ungerade Ziffern. Werden diese beiden Anzahlen und die gesamte Stellenzahl – also 35 – hintereinander gesetzt, so entsteht 211 435. Nach entsprechenden Wiederholungen ergibt sich der Reihe nach 246, 303, 213, 123, 123, 123 … Kaum zu glauben, dass auf diese Weise erneut ein Schwarzes Loch lokalisiert wurde!

Die Begründung dafür ist nicht einmal sonderlich schwierig. Der entscheidende Punkt ist, dass man bei Anwendung dieses Prozesses auf eine noch so große Zahl früher oder später bei einer dreistelligen landet. Danach gibt es nur noch die vier Möglichkeiten 303, 213, 123 und 033, die allesamt unmittelbar zu 123 führen.

Diese Entzauberung verlangt geradezu nach etwas Tiefgründigerem. Sei's drum! Benötigt wird dazu eine beliebige durch 3 teilbare Zahl. Diesmal sollen ihre Ziffern in die dritte Potenz gesetzt und aufaddiert werden. Fortgesetzte Anwendung dieses Prinzips liefert für den Startwert 36:

$3^3+6^3=27+216=243$, $2^3+4^3+3^3=99$,
$9^3+9^3=1458$, $1^3+4^3+5^3+8^3=702$,
$7^3+0^3+2^3=351$, $3^3+5^3+1^3=153$,
$1^3+5^3+3^3=153$, …

ein Endresultat, das sich für jede nur erdenkliche Zahl ergibt, die ohne Rest durch 3 teilbar ist.



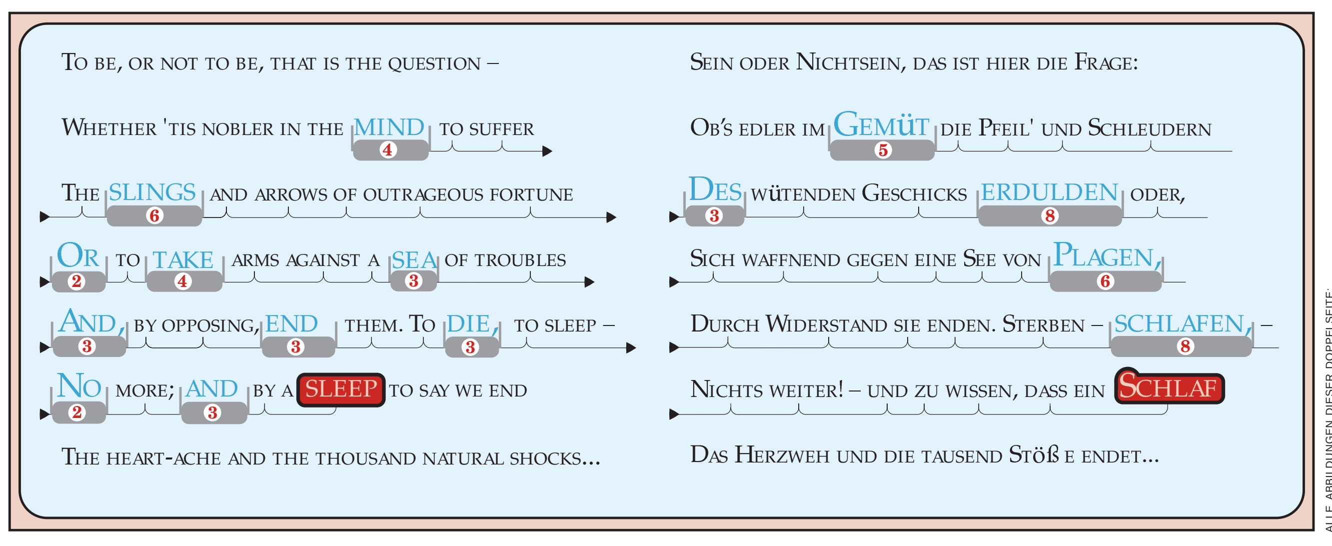
Man falte einen genügend langen Papierstreifen (*a*) in beliebiger Richtung schräg nach oben (*b*), öffne ihn wieder (*c*), falte entlang dem entstandenen Knick nach unten (*d*), öffne erneut (*e*), und so weiter. Durch Wiederholung dieses Prozesses entsteht eine Zickzacklinie, die mit immer größerer Genauigkeit gleichseitige Dreiecke abgrenzt (*f*).

Hingegen kann 153 für die nicht durch 3 teilbaren Zahlen garantiert kein Schwarzes Loch sein. Begründung: Ist *s* eine Zahl und *t* die durch den beschriebenen Prozess daraus resultierende, so muss mit *s* auch *t* durch 3 teilbar sein und umgekehrt. Lässt deshalb *s* durch 3 dividiert einen Rest, so trifft das auch für alle Folgeglieder zu. Darum kann man unter den genannten Umständen nie bei der durch 3 teilbaren Zahl 153 ankommen. Genauer: Ist *s* nicht durch 3 teilbar, so gerät man entweder in eine Schleife oder in eines der Schwarzen Löcher 1, 370, 371 und 407. Beispiele: 160 → 217 → 352 → 160 → 217 → 352 → … sowie 4421 → 137 → 371 → 371 → …

Schwarze Löcher im Papierstreifen und in der Sprache

Dies sind nur einige von beinahe unzähligen Beispielen für Schwarze Löcher im Universum der Zahlen. Nicht zu vergessen die Welt der Geometrie! Eine wiederholt angewandte Faltanweisung, ausgeführt an einem Papierstreifen, erbringt in immer besserer Näherung eine unendliche Folge gleichseitiger Dreiecke (Bild rechts oben).

Man kann das Spiel mit den Schwarzen Löchern auch in der Welt der Sprache betreiben. Schreibt man etwa 47 als „siebenundvierzig“ aus und zählt die Buchstaben dieses Wortes, so ergibt sich 16 („sechzehn“). Erneute Buchstabenzählung liefert 8 („acht“) und danach 4 („vier“), 4 („vier“), 4 („vier“) … Damit ist – eine kleine Analyse zeigt es – die Vier als universaler Zahlenfänger ent- ▶



Der berühmte Monolog aus „The Tragedy of Hamlet, Prince of Denmark“ von William Shakespeare (1564–1616) im Original und in der Übersetzung von August Wilhelm Schlegel (1767–1845). Man wandere von einem beliebigen Wort im Text um so viele Worte weiter, wie das gewählte Wort Buchstaben hat, etwa von „Gemüt“ (5 Buchstaben) mittels „die Pfeil' und Schleudern des“ (5 Worte) zu „des“. Unabhängig vom Anfangswort endet die Wanderung in „sleep“ beziehungsweise „Schlaf“.

3077 → 9232 → 4616 → 2308 → 1154 → 577 → 1732 → 866 → 433 → 1300 → 650 → 325 → 976 → 488 → 244 → 122 → 61 → 184 → 92 →



DIe Umkehrung der Collatz-Iteration. Aus jeder Zahl *n* des Baumes sprießt ein Zweig, der zu ihrem Doppelten 2*n* führt, sowie möglicherweise ein zweiter, der zu (*n*–1)/3 führt – vorausgesetzt, die Division geht auf.

larvt, zumindest in der deutschen Sprache. Im Englischen ist es sinnigerweise dieselbe Zahl. Beispiel (Bindestriche nicht mitgezählt): 87 („eighty-seven“), 11 („eleven“), 6 („six“), 3 („three“), 5 („five“), 4 („four“), 4 („four“) …

Einem ähnlichen Phänomen begegnet man im dem wohl berühmtesten Monolog der Weltliteratur (Bild Seite 113 unten). Dazu suche man sich ein beliebiges Wort in den ersten drei Versen von „Sein oder Nichtsein“ aus und zähle (unter Vernachlässigung von Satz- und Auslassungszeichen) so viele Worte weiter, wie das gewählte Wort Buchstaben besitzt. Mit dem neuen Wort verfahre man genau gleich und so weiter. Ist es Zufall oder nicht, dass man unabhängig von der zu Beginn getroffenen Wahl bei „Schlaf“ anlangt?

Einerseits ist es kein Zufall, andererseits trotz allem doch. Hintergrund ist nämlich ein vor rund 30 Jahren von Martin D. Kruskal von der Universität Princeton (New Jersey) entdecktes Prinzip: Ist die Anzahl der Wörter in einem beliebigen Text (es braucht also nicht der Hamlet-Monolog zu sein) deutlich größer als die Anzahl der Buchstaben seines längsten Wortes, so landet man unabhängig von der anfangs getroffenen Wahl früher oder später an der gleichen Stelle. Insofern ist das beschriebene Mysterium nicht absonderlich. Zufall dagegen ist, dass bei „Sein oder Nichtsein“ gerade „Schlaf“ und nicht etwa das Wort davor („ein“) oder danach („das“) herauskommt.

Insbesondere ist es nicht unbedingt göttliche Fügung, dass eine Wanderung durch den Beginn der Schöpfungsgeschichte stets bei „Gott“ endet, und zwar sowohl in der Luther-Übersetzung als auch („God“) in der King James Bible (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 112).

Die rätselhafte Collatz-Folge

Man mag zu Recht die eine oder andere der hier vorgestellten Fallstudien als zwar amüsant, aber nicht weiter bedeutungsvoll empfinden. Und doch gibt es ein regelrecht beleidigend simpel zu beschreibendes Beispiel, das seit nunmehr bald fünfzig Jahren den Fachleuten erhebliches Kopfzerbrechen bereitet. Urheber ist mit Lothar Collatz (1910–1990) ein weltweit renommierter Numeriker, der schon als Student den entsprechenden Einfall hatte.

Bei dieser Iterationsvorschrift werden gerade Zahlen halbiert, ungerade dagegen verdreifacht und anschließend um 1 erhöht. Es geht also 14 in $14/2=7$ über und 11 in $3\times 11+1=34$. Beispiel: $7 \to 22 \to 11 \to 34 \to 17 \to 52 \to 26 \to 13 \to 40 \to 20 \to 10 \to 5 \to 16 \to 8 \to 4 \to 2 \to 1 \to 4 \to 2 \to 1$ … Wie hier gleicht der Ablauf regelmäßig einer Fahrt mit der Achterbahn, die in Abhängigkeit von der Startzahl nach mehr oder weniger vielen Aufs und Abs zu einer Zweierpotenz (4, 8, 16, 32 …) führt, womit der unweigerliche Absturz gegen 1 eingeleitet wird. Einmal dort angelangt, dreht sich die Folge ewig im Kreise: $1 \to 4 \to 2 \to 1$ …

Umfangreiche Experimente mittels Computern haben diesen Effekt in nunmehr über 700 Milliarden Fällen bestätigt. Man vermutet deshalb, dass kein noch so gigantischer Startwert sich einem derartigen Sog entziehen kann, sich also der Zyklus $1 \to 4 \to 2 \to 1$ als allumfassendes Schwarzes Loch erweist.

Demnäch müsste in dem unbeschränkt fortgesetzt gedachten Baum (Bild links), der die Collatz-Iteration rückwärts verfolgt, jede erdenkliche Zahl irgendwo zu finden sein. Das Problem ist bis in die jüngste Zeit intensiv studiert worden; eine vor wenigen Jahren erschienene Monographie nennt gegen 150 Titel. Gleichwohl ist das Rennen um einen Beweis noch völlig offen. ■

… aber in allen bisher untersuchten Fällen endet die Collatz-Folge in dem ewig wiederholten Zyklus 1, 4, 2, 1, 4, 2, 1 …

46 → 23 → 70 → 35 → 106 → 53 → 160 → 80 → 40 → 20 → 10 → 5 → 16 → 8 → 4 → 2 → 1



François Fricker *ist Professor für Mathematik an der Universität Gießen, Zauberkünstler (Spezialgebiet: Spielkarten) und Autor zahlreicher populärwissenschaftlicher Artikel.*

Literaturhinweise

The Dynamical System Generated by the 3n+1 function. Von Günther J. Wirsching. Lecture Notes in Mathematics, Bd. 1681. Springer, Heidelberg 1998.

The Game of Diffy. Von Raymond Grenwell in: The Mathematical Gazette, Bd. 73, S. 22, 1989.

Einwegwindeln

Superabsorber halten Babys trocken

Wenn eine Mutter ihrem Baby zum ersten Mal eine volle Windel abnimmt, dürfte sie überrascht sein – nicht über den Inhalt, sondern über das enorme Gewicht. Heutige Einwegwindeln fassen rund 1,5 Liter Flüssigkeit und fühlen sich dabei immer noch trocken an. Weil Hautreizungen damit leichter zu vermeiden sind und Mütter schlicht Zeit sparen, fristen auswaschbare Stoffwindeln nur noch ein Nischendasein.

Für die erstaunlich hohe Absorptionsfähigkeit sorgen Polyacrylate, eine Familie hydrophiler, also Wasser anziehender Polymere. Der einfachste Vertreter ist Natriumacrylat, es kann das 800fache seines Gewichts an destilliertem Wasser aufnehmen. Freilich besteht Urin nicht nur aus Wasser. Darin gelöste Salze und Ionen vermindern das Fassungsvermögen um mehr als den Faktor zehn. Die Branchenführer der Windelhersteller verwenden deshalb eine Kombination von Polyacrylaten. Ein solches Rezept wird aber streng geheim gehalten – der Windelmarkt ist heiß umkämpft.

Einwegwindeln halten die Haut trockener als solche aus Stoff. Vermutlich sind sie deshalb für das Baby gesünder, doch die Situation ist unklar: Stoffwindeln werden öfter gewechselt, und ihre Träger scheinen nicht häufiger als andere einen Hautausschlag zu bekommen. Marktführer in Sachen Wegwerfprodukt Procter & Gamble verweist aber darauf, dass Häufigkeit und Schweregrad von Hautreizungen in den letzten 15 Jahren deutlich abgenommen hätten, und das sei eine Folge der immer besseren Einwegwindeln.

Stoffwindel-Advokaten verweisen im Gegenzug auf die Umweltkosten: Die Wegwerf-Produkte erfordern nicht nur einen höheren Chemikalieneinsatz, sondern stellen allein in Deutschland mit 570 000 Tonnen pro Jahr etwa drei bis fünf Prozent des Hausmülls. Sie sind dann mechanisch-biologisch, auf Deponien oder in Verbrennungsanlagen zu entsorgen (ab dem Jahr 2005 ist die Deponierung ausgeschlossen). Doch Studien zur ökologischen Gesamtbilanz von Stoffwindeln im Vergleich zu Einwegwindeln kamen in den neunziger Jahren überwiegend zu dem Schluss, beide Produkte belasteten die Umwelt letztlich in gleichem Maße (Stoffwindeln über die zu reinigenden Abwässer). So ist es wohl eher eine Frage der Einstellung, welcher Variante man dem Vorzug gibt. ■

Madhusree Mukerjee *ist Redakteurin bei Scientific American und Mutter eines zweijährigen Jungen.*

Einwegwindeln für Babys können etwa 1,5 Liter Leitungswasser aufnehmen, spezielle Inkontinenzprodukte das Doppelte davon. Das Geheimnis: Superabsorbentien.

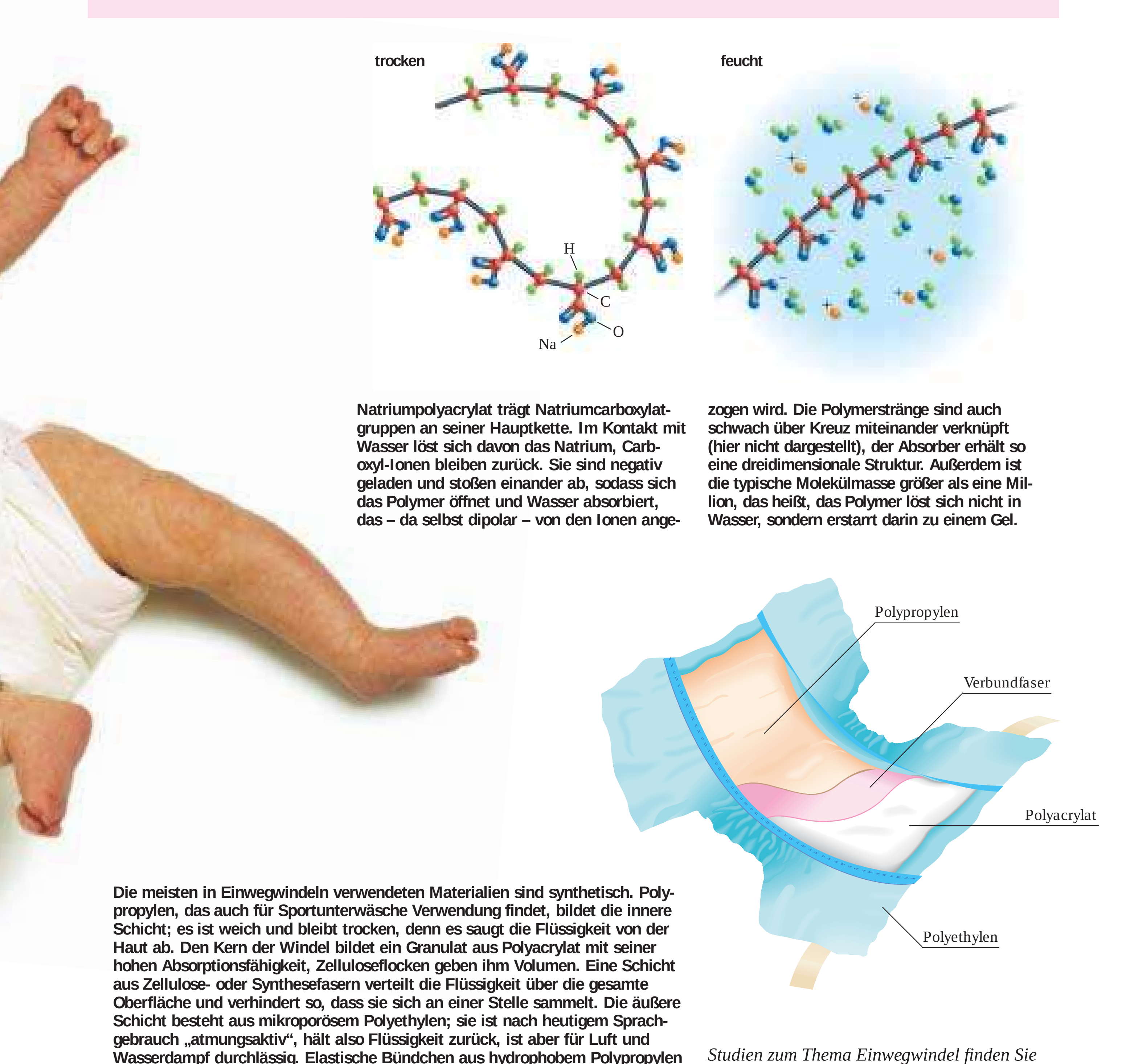
GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE UND GEORGE RETSECK
FOTO: VINCENT OLIVER / STONE

Wussten Sie, dass ...

➤ Superabsorbentien nicht nur der persönlichen Hygiene dienen, sondern auch anderweitig verwendet werden? Bei der Entsorgung von medizinischen Abfällen in Kliniken, zum Schutz von industriellen Strom- oder optischen Kabeln vor Wasser, um Wasser aus Flugzeugtreibstoff zu filtern, zur Behandlung von Gartenerde, damit sie Wasser hält – nicht zuletzt auch für Spielzeug, das sich in Wasser ausdehnt.

➤ einigen Studien zufolge Babys, die Stoffwindeln tragen, fast ein Jahr früher auf die Toilette gehen als Babys mit Einwegwindeln? Eine Erklärung wäre, dass sie wegen der hohen Absorptionsfähigkeit ebenso wenig wie die Pflegeperson wissen, wann es passiert, und so die Assoziation mit dem Gebrauch einer Toilette fern liegt. Allerdings gibt es auch gegenteilige Studien etwa aus Japan mit eineiigen Zwillingen.

➤ in tropischen Ländern Babys und Kleinkinder häufig gar keine Windeln tragen? Indische Mütter halten es sogar für grausam, ein Baby in eine unbelüftete „Verpackung“ zu sperren.



Natriumpolyacrylat trägt Natriumcarboxylatgruppen an seiner Hauptkette. Im Kontakt mit Wasser löst sich davon das Natrium, Carboxyl-Ionen bleiben zurück. Sie sind negativ geladen und stoßen einander ab, sodass sich das Polymer öffnet und Wasser absorbiert, das – da selbst dipolar – von den Ionen angezogen wird. Die Polymerstränge sind auch schwach über Kreuz miteinander verknüpft (hier nicht dargestellt), der Absorber erhält so eine dreidimensionale Struktur. Außerdem ist die typische Molekülmasse größer als eine Million, das heißt, das Polymer löst sich nicht in Wasser, sondern erstarrt darin zu einem Gel.

Die meisten in Einwegwindeln verwendeten Materialien sind synthetisch. Polypropylen, das auch für Sportunterwäsche Verwendung findet, bildet die innere Schicht; es ist weich und bleibt trocken, denn es saugt die Flüssigkeit von der Haut ab. Den Kern der Windel bildet ein Granulat aus Polyacrylat mit seiner hohen Absorptionsfähigkeit, Zelluloseflocken geben ihm Volumen. Eine Schicht aus Zellulose- oder Synthesefasern verteilt die Flüssigkeit über die gesamte Oberfläche und verhindert so, dass sie sich an einer Stelle sammelt. Die äußere Schicht besteht aus mikroporösem Polyethylen; sie ist nach heutigem Sprachgebrauch „atmungsaktiv“, hält also Flüssigkeit zurück, ist aber für Luft und Wasserdampf durchlässig. Elastische Bündchen aus hydrophobem Polypropylen um die Schenkel machen die Windel dicht, Klettverschlüsse fixieren sie.

Studien zum Thema Einwegwindel finden Sie unter: http://www.forum-hygiene.de/studien/



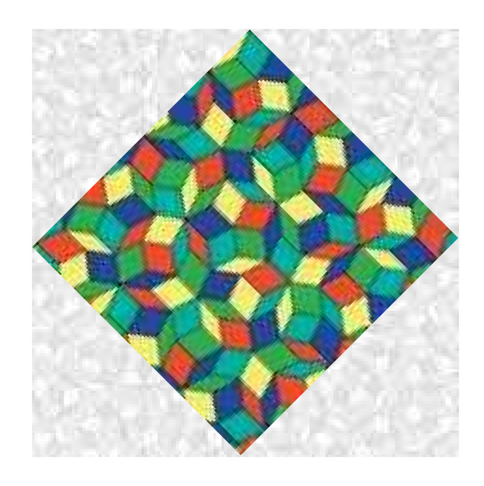
Die ältesten Sterne im Universum

DON DIXON

Erst hundert Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden erstmals Sterne – kurzlebige Riesen, die bald als Supernovae oder Schwarze Löcher zu Grunde gingen.

Was ist aperiodische Ordnung?

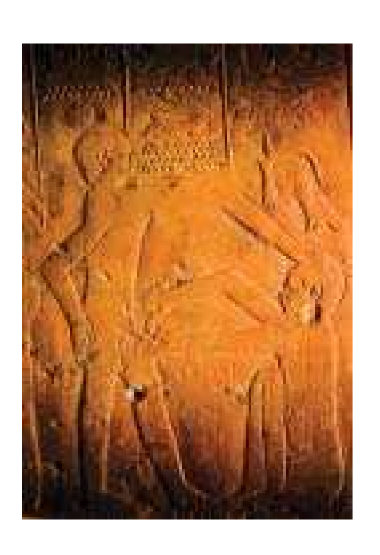
Sie sind regelmäßig, aber auf eine völlig ungewohnte und faszinierende Art: nichtperiodische Parkette in der Geometrie und Quasikristalle in der Natur. Die einen können die Struktur der anderen erklären.



Kampf dem Kahlkopf

Die Entdeckung von Signalmolekülen, welche die Haarbildung steuern, eröffnet neue Chancen, den Haarausfall zu stoppen oder sogar rückgängig zu machen.

JEFF MERMELSTEIN



Chirurgie im alten Ägypten

Dass es im Reich der Pharaonen Ärzte verschiedenster Fachrichtungen gab, ist unbestritten. Nur die Chirurgenzunft hatte sich kaum in Schrift und Bild verewigt. Deutsche Pathologen entdeckten nun bei der Untersuchung von Mumien Spuren größerer und erfolgreicher Eingriffe.

Weitere Themen im Februar

Der Milzbrand-Erreger

Langsam, aber sicher gelingt es der Wissenschaft, dem tödlichen *Bacillus anthracis* auf die Schliche zu kommen. Fieberhaft erforschen Mikrobiologen die Infektionsmechanismen und die Giftstoffe des Erregers.

Wie die Erde ihr Magnetfeld erzeugt

Ein aufwendiges Experiment im Forschungszentrum Karlsruhe erbrachte den Nachweis: Eine rotierende, elektrisch leitende Flüssigkeit kann ein stabiles Magnetfeld hervorrufen. Damit war es erstmals gelungen, die Entstehung des Erdmagnetfelds im Labor zu simulieren.